

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

REKUPERACE V SYSTÉMU 25 kV

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek PANUŠKA**
Osobní číslo: **E16N0016P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Rekuperace v systému 25kV**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

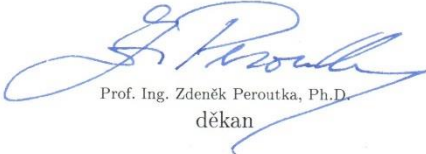
1. Charakterizujte fyzikální a technickou podstatu problému a uveďte požadavky z předpisů a norem
2. Specifikujte technické problémy na straně vozidel a jejich řešení
3. Specifikujte technické problémy na straně pevných trakčních zařízení a jejich řešení
4. Specifikujte technické problémy na straně distribuční sítě a jejich řešení
5. Uveďte tolerance napětí a meze hodnot proudu




Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Jiří Danzer: Elektrická trakce, ZČU 2009

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Šásek, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018
Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na specifické technické problémy rekuperace v systému 25 kV, který je využíván pro provoz trakční dopravy nejen v ČR. Jsou zde shrnuty požadavky norem vztahující se na fyzikální a technickou podstatu problému rekuperace pro tento napájecí systém trakčního vedení. Následně jsou popsány možnosti rekuperace, jak ze strany vozidel, pevných trakčních zařízení tak ze strany distribuční sítě. V závěru bude provedena analýza, porovnání rekuperací jízdních souprav a vyhodnocení systémů využívající rekuperaci s ohledem na ekonomiku provozu a plynulost řízení.

Klíčová slova

Rekuperace, trakce, trakční vozidla, trakční zařízení, distribuční síť, napětí 25 kV, napětí 3 kV, trakční charakteristiky, jízdní odpory, Vectron, Desiro HC

Abstract

This Master thesis is focused on specific technical troubles of recuperation in power net 25 kV, which is not only used for traction vehicles in the Czech Republic. In this thesis are mentioned the requests of norms tied with physical and technical principles together for this traction power system. Next point describes the possibilities of recuperation from train vehicles views and from distribution power net side. In the end will be performed the analysis of different electrical train units on the 2 most used power traction systems in the Czech Republic. And there will be summarized economical impact and comparison among each electrical train units.

Key words

Recuperation, traction, traction vehicles, traction equipment, distribution power network, voltage 25 kV, power traction characteristic, driving traction resistance, Vectron, Desiro HC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 28.5.2019

Bc. Marek Panuška

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval odbornému konzultantovi Ing. Jiřímu Šaškovi Ph.D. ze společnosti Siemens, který se danou problematikou zabývá a poskytl cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také bych nerad opomenul na svého vedoucího práce, pana doc. Ing. Bohumila Skalu, Ph.D., který mi byl neméně nápomocen s problematikou a administrativním zajištěním diplomové práce. Dále děkuji celé své rodině, přítelkyni a přátelům za poskytnutou podporu během studia.

Obsah

OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 REKUPERACE.....	13
1.1 ČSN EN 50 388.....	13
1.1.1 <i>Koordinace ochran.....</i>	<i>13</i>
1.1.2 <i>Problematika účinníku.....</i>	<i>14</i>
1.1.3 <i>Podmínky rekuperace</i>	<i>16</i>
1.1.4 <i>Problematika vyšších harmonických</i>	<i>18</i>
1.1.5 <i>Kompatibilita systému</i>	<i>19</i>
1.2 ČSN EN 50 163.....	22
1.3 FYZIKÁLNÍ A TECHNICKÁ PODSTATA PROBLÉMU	22
1.3.1 <i>Energetický potenciál brzdění</i>	<i>23</i>
1.3.2 <i>Jízdní a traťové odpory.....</i>	<i>25</i>
1.3.3 <i>Zastavovací brzdění.....</i>	<i>28</i>
1.3.4 <i>Spádové brzdění.....</i>	<i>30</i>
1.4 KONCEPCE NAPÁJECÍ SOUSTAVY TV	30
1.4.1 <i>Stejnoseměrná soustava 1,5 kV / 3 kV.....</i>	<i>32</i>
1.4.2 <i>Střídavá soustava 15 kV / 16,7 Hz.....</i>	<i>34</i>
1.4.3 <i>Střídavá soustava 25 kV / 50 Hz.....</i>	<i>35</i>
1.4.4 <i>Interoperabilita.....</i>	<i>36</i>
2 TECHNICKÉ PROBLÉMY NA STRANĚ VOZIDEL.....	38
2.1 PRINCIP REKUPERACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	38
2.1.1 <i>Vozidlo na soustavě DC 3 kV s DC pohonem.....</i>	<i>38</i>
2.1.2 <i>Vozidlo na soustavě DC 3 kV s asynchronním pohonem</i>	<i>40</i>
2.1.3 <i>Vozidlo na soustavě AC 25 kV s asynchronním pohonem.....</i>	<i>43</i>
3 TECHNICKÉ PROBLÉMY NA STRANĚ PEVNÝCH TRAKČNÍCH ZAŘÍZENÍ A DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	52
3.1 IMPEDANCE VEDENÍ.....	52
3.2 JEDNOSTRANNÉ / OBOUSTRANNÉ NAPÁJENÍ ÚSEKŮ	53
3.3 NESYMETRICKÉ ZATÍŽENÍ TŘÍFÁZOVÉ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ.....	55
3.3.1 <i>Neutrální úsek.....</i>	<i>56</i>
3.3.2 <i>Napájení TV do „V“</i>	<i>57</i>
3.3.3 <i>Trakční napájecí stanice – TNS (NS)</i>	<i>58</i>
3.4 FILTRAČNĚ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ – FKZ	60
3.4.1 <i>Kompensace vyšších harmonických</i>	<i>60</i>
3.4.2 <i>Kompensace účinníku.....</i>	<i>61</i>
3.5 KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ – „AKTIVNÍ BALANCÉR“	63
3.5.1 <i>Vlastnosti.....</i>	<i>63</i>
3.5.2 <i>Popis a funkce zařízení.....</i>	<i>64</i>
4 TOLERANCE NAPĚTÍ A MEZE HODNOT PROUDU DRÁŽNÍCH ZAŘÍZENÍ	66

4.1	NAPĚTÍ	66
4.2	KMITOČET	67
4.3	PROUD	67
5	STUDIE VLIVU REKUPERACE NA SPOTŘEBU ENERGIE PRO SPECIFICKÉ JÍZDNÍ SOUPRAVY A JEJICH CYKLY	68
5.1	POPIS PROBLEMATIKY – ZADÁNÍ	69
5.2	SPECIFIKACE VLAKOVÝCH SOUPRAV	70
5.2.1	<i>Osobní vlak</i>	70
5.2.2	<i>Nákladní vlak</i>	72
5.2.3	<i>Expresní vlak</i>	72
5.2.4	<i>Regionální – soupravový vlak</i>	73
5.3	VÝPOČET JÍZDNÍCH ODPORŮ, TRAKČNÍCH ODPORŮ	74
5.4	VÝPOČET EDB – ENERGIE, ČAS, VZDÁLENOST	77
5.5	VÝPOČET ZRYCHLENÍ – ENERGIE, ČAS, VZDÁLENOST	79
5.6	VÝPOČET KONSTANTNÍ JÍZDY – ENERGIE, ČAS, VZDÁLENOST	80
5.7	VÝPOČET SPOTŘEBY ENERGIE BĚHEM PROCESU STÁNÍ	81
5.8	ZTRÁTY V TRAKČNÍM VEDENÍ	83
5.8.1	<i>Stanovení trati a výpočet ztrát</i>	83
5.8.2	<i>Rozjezdový a brzdový proud, energie ztracená ve vedení</i>	85
5.8.3	<i>Proud konstantní jízdy, energie ztracená ve vedení</i>	88
5.9	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	90
6	ZÁVĚR	92
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	95
	SEZNAM TABULEK	99
	SEZNAM OBRÁZKŮ	100
	PŘÍLOHY	1

Úvod

Cílem diplomové práce je shrnutí všech aktuálně dostupných možných dat, poznatků a problémů okolo zmíněného tématu. Existuje mnoho zdrojů, které se zabývají danou problematikou. Většinou jsou však zaměřeny pouze na jednu oblast, byť detailně. Komplexní náhled do problematiky rekuperace lze obtížně najít. Zde je ucelený přehled zaměřený na zhodnocení možností rekuperace v trakci během brzdění a přinášející objektivní data, která se budou přibližovat, co možná nejvíce realitě. První část diplomové práce je věnována normám, předpisům a jejich obsahu, který se zabývá trakčními zařízeními. Následně je vysvětlena fyzikální podstata během brzdění, tato část teorie bude mít návaznost na poslední kapitulu. Následujícím bodem úvodní kapitoly je přehled trakčních soustav provozovaných v České republice, lišících se od sebe úrovní napětí a způsobem napájení. Trakční soustavy jsou stručně popsány a jsou přehledně vyznačeny klady a zápory jednotlivých systémů.

Další část práce popisuje často používané trakční pohony. Kapitola postupuje od počátků, kdy řízení pohonů bylo složité a z dnešního hlediska příliš ztrátové, až do současné doby. Porovnává a zhodnocuje jednotlivé pohony. Jsou zde opět porovnány pohony jak stejnosměrné, tak střídavé, protože vývoj trakčních pohonů, strojů a měničů spolu úzce kooperoval. A byl používán pro stejnosměrný tak i střídavý systém.

Předposlední kapitola je věnována problematikým jevům na střídavém trakčním systému, které vznikají jak během rozjezdu a jízdy, tak i rekuperace. Technické problémy pevných trakčních zařízení jsou sloučeny dohromady s problémy, které přecházejí na dodavatele energie do distribuční sítě, protože jsou spolu úzce spjaty.

Největším přínosem diplomové práce není rešeršní činnost, ale poslední kapitola, která navazuje na fyzikální podstatu z kapitoly první. Rozšiřuje ji o vypočtená data získaná z jednotlivých jízdních modelů vlakových souprav. Výpočty prochází přes získání jízdních odporů po výpočet energie spotřebované při rozjezdu, jízdě a následně výpočet energie získané při brzdění. Jsou zde zahrnuty i činné ztráty na vedení. Stav, kdy vlaková souprava stojí a trakční pohon je v nečinnosti. Vše je zakončeno celkovým vyhodnocením, jaké množství energie je reálně ušetřit a zdali pojem rekuperace v trakci je opravdu na místě.

Seznam symbolů a zkratek

TV	–	Trakční vedení
TT	–	Trakční transformovna
ČR	–	Česká republika
ČSN	–	Česká technická norma
EN	–	Evropská norma
Obr	–	Obrázek
Hz	–	Hertz
kV	–	Kilovolt
VN	–	Vysoké napětí
DC	–	Direct current (stejnoseměrné napětí)
AC	–	Alternate current (střídavé napětí)
N	–	Newton
Mm ²	–	Milimetr čtvereční
Km	–	Kilometr
TSI	–	Technical Specification for Interoperability, technická specifikace pro interoperabilitu
TNS	–	Trakční napájecí stanice
CR	–	Conventional Railway
Ek	–	Kinetická energie
J	–	Joul
Kg	–	Kilogram
m/s	–	Metr za sekundu
km/h	–	Kilometr za hodinu
t	–	Čas
v	–	Rychlost
min	–	Minuta
O _J	–	Jízdní odpor
O ₁	–	Jízdní odpor vztažený na 1 kN tíhy lokomotivy
O _T	–	Traťový odpor
kN	–	Kilonewton
O _{jvlak}	–	Součinitel jízdního odporu celkové vlakové soupravy
O _{skl}	–	Odpor sklonu
O _{obl}	–	Odpor oblouku
O _{TRAK}	–	Trakční součinitel odporu
r	–	Poloměr oblouku
α	–	Úhel stoupání
G	–	Tíha
N/kN	–	Poměrová jednotka Newton / kilo Newton
h	–	Výška
l	–	Délka
F _B	–	Brzdná síla
F _{BCELK}	–	Celková brzdná síla
V ₀	–	Počáteční rychlost
a	–	Zrychlení, zpomalení
F _O	–	Urychlující síla
U _t	–	Trakční napětí
EMU	–	Electrical Multiple Unit
λ _{ind}	–	Induktivní účinník

λ_{kap}	–	Kapacitní účinník
MW	–	Megawatt
TNS	–	Trakční napájecí stanice
OZ	–	Opětovné zapínání
kW	–	Kilowatt
U_{max1}	–	Nejvyšší trvalé napětí
U_{min1}	–	Nejnižší trvalé napětí
R	–	Činný odpor
L	–	Indukčnost
C	–	Kapacita
A	–	Ampér – jednotka proudu
PWM	–	Pulzně šířková modulace

1 REKUPERACE

Rekuperací na trakčním vedení (dále jen TV) se všeobecně zabývají normy ČSN EN 50 163 a ČSN EN 50 388. Obě tyto normy platí pro doposud užívané systémy TV v ČR, ale i v Evropě, protože se jedná o evropskou normu, která má status české technické normy. Normy popisují vztah drážních zařízení jako je napájecí napětí trakčních soustav a technická kritéria pro koordinaci mezi napájecí stanicí a vozidlem za účelem dosažení interoperability.

1.1 ČSN EN 50 388

Norma ČSN EN 50 388 stanovuje požadavky čtyř kategorií, přičemž pojednává o:

- koordinaci zásad ochran mezi napájením a hnací jednotkou,
- instalovaném výkonu na trati a tím i odebíraném výkonu,
- rekuperačním brzděním hnací jednotky s možností pojmout rekuperovanou energii zpět do napájení,
- koordinací týkající se vyšších harmonických.

1.1.1 Koordinace ochran

Norma ČSN EN 50 388 stanovuje nutnost kompatibility ochranných systémů na hnacích jednotkách, tak i na trakčních napájecích stanicích. Zmíněná zařízení musí být vybavena ochrannými prvky, které dokáží spolehlivě zabránit zkratům mezi trakčním vedením a zemním potenciálem, ale i vnitřním zkratem na hnací jednotce. Pro eliminaci vzniku zkratových proudů na vedení jsou trakční napájecí stanice a hnací vozidla opatřena automatickým vypínačem. V případě vnitřního zkratu na hnací jednotce je mimo vypínače v napájecí stanici automaticky okamžitě vypínán hlavní rychlovypínač umístěný na vozidle. Výskyt maximálních poruchových proudů v jednotlivých systémech je uveden v Tab. 1. Během poruch, kde hodnota proudu dosahuje vysoké hladiny, jsou ochrany schopny reagovat okamžitě, tzn. v řádech desítek milisekund. Přičemž platí, že při neaktivaci ochrany prvního stupně, zapůsobí relé druhého stupně přibližně o 300 ms později [1].

Tab. 1: Hodnoty maximálních zkratových proudů při poruše na trakčním vedení

Napájecí soustava	Trakční napájecí stanice zapojená paralelně	Maximální poruchový proud [kA]
AC 25 kV, 50 Hz	NE	15
AC 15 kV, 16,7 Hz	ANO	40
DC 3 kV	ANO	50

Je důležité poukázat na fakt, že je zde rozdíl v pořadí vypnutí vypínačů mezi hnacím vozidlem a trakční napájecí stanicí dle systému AC a DC. U AC soustavy, pokud je to možné, má vypnout automaticky vypínač hnací jednotky, aby se zabránilo vypnutí automatických vypínačů trakční napájecí stanice. U systému DC je při zkratu cílem vypnutí vypínače v trakční napájecí stanici velmi rychle, aby nebyl zkratový proud vypínán automatickými vypínači hnací jednotky [1].

Automatické vypínače v trakčních napájecích stanicích umožňují automatické opětovné zapínání vypínačů (OZ), za účelem obnovení síťového napětí na hnací jednotku a testu sítě na trvalý zkrat (pokud jsou vybaveny tímto systémem). V případě opětovného zapnutí vypínačů po zkratu je nezbytné, aby automatické vypínače hnacích jednotek nacházejících se v oblasti napájeného úseku trakční napájecí stanicí byly vypnuty. Automatické vypínače hnacích jednotek vypínají automaticky do 3 s po ztrátě síťového napětí, čímž splní podmínku pro opětovné zapnutí vypínačů v trakční napájecí stanici a automatické vypínače nespouští opětovné zapínání vypínačů dříve než po 5 s od vypnutí [1].

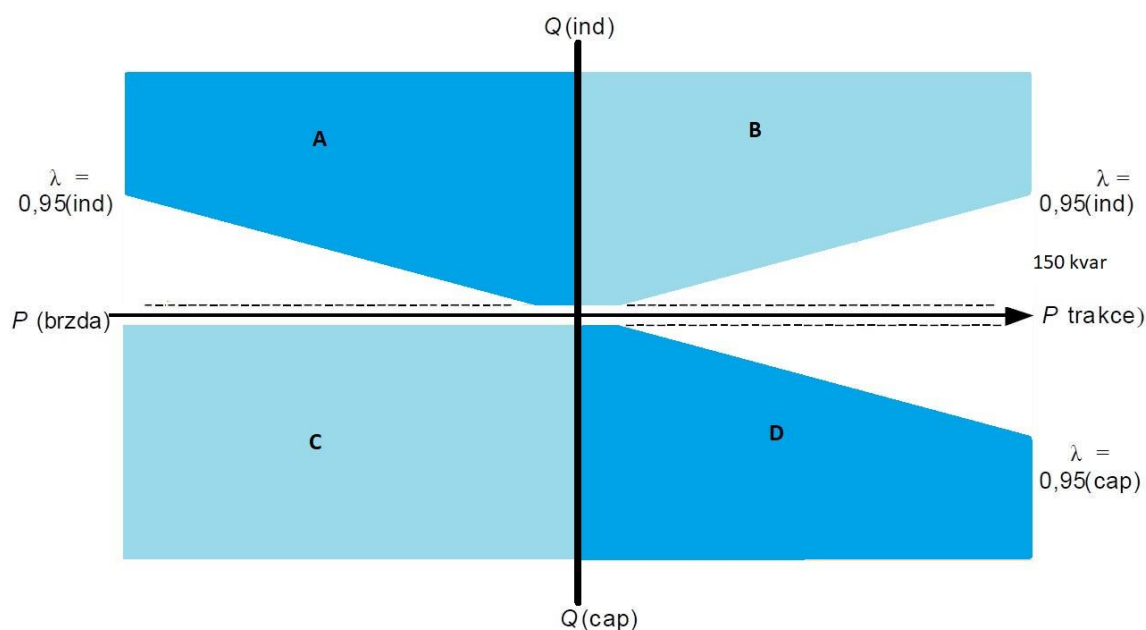
1.1.2 Problematika účinníku

Vlastnost odebíraného skutečného výkonu a spotřeba energie vlaků je jedna z dalších věcí, které jsou touto normou sledovány. Účinník vlaku je celkový průměr všech provozních stavů za čas, který ovlivňuje kvalitu napájení a charakter účinníku může mít za následek i změnu napětí trakčního vedení. Charakter účinníku je induktivní λ_{ind} a kapacitní λ_{kap} , v souvislosti, jaký výkon vlak odebírá. Nicméně platí, že čím lepší účinník je, tím menší nároky mohou být kladeny na pevná trakční zařízení [1].

Dle normy platí, že vlaky s výkonem větším než 2 MW musí mít induktivní účinník lepší než 0,95. Pro hnací vozidla s výkonem menším než 2 MW je induktivní účinník stanoven

na 0,85. I pro volně odstavené vlakové soupravy, které stojí v depech nebo na odstavných kolejích je definován induktivní účinník vyšší než 0,8. To za podmínky, že vozidlo má trakční příkon vypnutý, ale všechna pomocná zařízení odebírají činný výkon větší než 200 kW. V režimu brzdy, během rekuperace, je možné nechat induktivní účinník volně poklesnout. Ale pokud se napětí sítě dostane pod nominální hodnotu, je vhodné, aby λ_{ind} nebyl nižší než 0,95 [1].

Kapacitní účinník v režimu jízda, kdy vlak elektrickou energii spotřebovává, omezení nemá. Nicméně výskyt kapacitního účinníku ve slabých sítích s možností zajištění schopnosti rekuperovat energii zpět do trakčního vedení je nežádoucí. Norma stanoví omezení pro všechna hnací vozidla, která se nesmí chovat jako kondenzátor při překročení nejvyššího trvalého napětí U_{max1} . Během režimu rekuperace smí být případný dodávaný kapacitní výkon omezen na 150 kVar od U_{min1} do U_{max1} definovaný v ČSN EN 50 163 [1].



Obr. 1: Zobrazení požadavků normy na kapacitní a induktivní účinník [1]

Tab. 2: Vysvětlení grafu přípustného účinníku v závislosti na odebíraném výkonu [1]

A	Nežádoucí plocha pro síťová napětí nižší než normální napájecí napětí
B	Zakázaná plocha pro síťová napětí nižší než U_{max1}
C	Zakázaná plocha
D	Nežádoucí plocha pro síťová napětí vyšší než normální napájecí napětí
P (trakce, brzda)	Trakční (resp. brzdový) činný výkon
Q (ind, kap)	Induktivní (resp. kapacitní) jalový výkon

1.1.3 Podmínky rekuperace

Podmínky rekuperace jsou dány zejména normou ČSN EN 50388 a s tím související normou ČSN EN 50163 ed. 2, která stanovuje základní charakteristiky napětí pro všechna trakční zařízení. Norma ČSN EN 50163 ed. 2 bude vysvětlená dále. Norma ČSN EN 50388 stanovuje požadavky pro hnací jednotky, které dle těchto podmínek smí využít rekuperaci.

Veškerá nová kolejová vozidla závislé trakce jsou běžně vybavována rekuperační elektrodynamickou brzdou, která slouží k přeměně kinetické brzdě energie na energii elektrickou. Detailnější rozbor a princip rekuperace drážních vozidel bude vysvětlen v kapitole 2.1. O ekonomické výhodnosti rekuperace při brzdění vlakových souprav bylo zpracováno mnoho studií a článků a lze ji považovat za jednoznačně přínosnou. Teorii úspory energie najdeme v kapitole 5 [1].

Pokud si ale uvědomíme, že rekuperačí rozumíme opačný tok energie, z vlakové soupravy do TV, místo toku proudu z TV do vlakové soupravy a uvážíme hmotnost celé soupravy při brzdění, vzniká zde nezanedbatelný výkon¹, který musí být zpětně pohlcen a je zde riziko ovlivnění vlastní trakční sítě. Tímto jevem mohou být významně ovlivněny funkce ochran trakčních napájecích a spínacích stanic. Proto je zde platná legislativní norma ČSN EN 50388, která uvádí [1]:

Vlak nesmí použít svoje rekuperační brzdy v případě, že:

- Dojde ke ztrátě napájecího napětí.
- Dojde ke zkratu mezi trakčním vedením a kolejnicí/zemí na stejném úseku.
- Trakční vedení neabsorbuje energii.
- Síťové napětí je vyšší než $U_{\max 2}$ (stanovuje ČSN EN 50163).

Všechny tyto body v dnešní době nejsou výraznou překážkou jak ze strany vozidel, tak pevných napájecích trakčních stanic. Lze říci, že v případě střídavé trakční sítě je velikost napětí velkou výhodou oproti DC systému a to proto, že proud trakčního vozidla na střídavé

¹ Nezanedbatelný výkon – v tomto případě znamená 2MW pro osobní vlaky, až 4 MW pro nákladní vlaky a 6-8 MW pro expresní vlaky a rychlovlaky s rychlostí nad 140 km/h.

trakční síti je výrazně nižší než v DC systému. To dává výhodu v detekci minimálních zkratových proudů, které jsou výrazně vyšší než proud rekuperace, a tak vliv na ochrany TNS je minimální. V AC systému je pomocí účinníku detekován tzv. měkký zkrat. Měkký zkrat má výrazně induktivní charakter a řízení usměrňovače neudrží účinník v příslušných mezích [1].

Ztráta napájecího napětí

Je bez potíží vyřešena. Trakční vozidlo dodává zpět do sítě při rekuperaci pouze činný proud za pomoci regulace účinníku pulsního usměrňovače, který je součástí výkonového obvodu schopného rekuperovat. Nicméně při odpojení TNS, která v připojeném stavu do TV dodává potřebnou jalovou energii, dochází k selhání regulace účinníku pulsního usměrňovače, ten je posléze zablokován vypnutím. K vypnutí dochází v řádu desítek ms. V systému DC napětí v meziobvodu vzroste na 3,5 kV a proud do troleje je omezen. K odpojení vozidla dojde do 3 s [1].

Zkrat v napájecím úseku

Tento bod lze rozdělit do situací, kdy vozidlo rekuperuje v úseku docházejícím ke zkratu a rekuperace nesmí narušit schopnost vybavení proudových ochran. A do situace, kdy vozidlo musí okamžitě ukončit rekuperaci do úseku se zkratem potom, co došlo k vypnutí úseku ze strany TNS [1].

Situace, kdy hnací vozidlo rekuperuje do zkratovaného úseku není pro ochrany problém. To z důvodu osazení distančních ochran, které rozeznají charakter rekuperovaného proudu od zkratového, a tím není zkratový proud rekuperovaným ovlivněn. Vozidlo do sítě dodává činný proud mnohem menší velikosti, na rozdíl od zkratového proudu s převládající jalovou induktivní složkou [1].

Požadavek ukončení rekuperace při vypnutí úseku v době zkratu je dnes také ošetřen. Vzhledem k výši napětí je i vzdálený zkrat na vozidle rozpoznatelný nadproudovou, nebo podpětřovou ochranou. I při vzdálených zkratech, kdy nevybaví nadproudová či podpětřová ochrana, dochází kvůli nízkému účinníku induktivního charakteru ke zkratovému proudu a k selhání regulace účinníku pulsního usměrňovače. Následně dochází k jeho vypnutí.

K účinku distanční ochrany dochází od určité hodnoty proudu, ale i při poklesu účinníku pod stanovenou mez, přičemž je sledován i charakter účinníku (kapacitní, induktivní). Ochrana reaguje pouze při poklesu induktivního účinníku [1].

Veškerá další problematika v systému 25 kV, zejména problematika vlivu vyšší harmonických proudů a EMC kompatibilita bude nastíněna v dalších kapitolách 2, 3, kde se zaměříme detailněji na možné překážky při přenosu rekuperované energie do distribuční sítě [1].

1.1.4 Problematika vyšších harmonických

Obecné vysvětlení, co jsou vyšší harmonické popisuje norma ČSN IEC 1000-2-1. Problematika vyšších harmonických nebyla dosud u stejnosměrného TV řešena, protože jde o jev, který vzniká u sinusových napětí nebo proudů o kmitočtech, které jsou celými násobky kmitočtu navržené provozní sítě (např. 50 Hz). Dle ČSN IEC 50 (161) je harmonická složka definována jako složka většího než 1. řádu Fourierovy řady periodické veličiny, přičemž složka 1. řádu Fourierovy řady jako základní harmonické. Řád harmonické je celé číslo, dané poměrem kmitočtů harmonické a základní harmonické. Hlavní podstatou tohoto jevu je, že každý periodický průběh je možno rozložit na součet sinusových průběhů a jejich kmitočet je násobkem základního kmitočtu periodického průběhu (např. 50 Hz). Původ harmonických vychází z lineárních obvodů (R, L, C) anebo nelineárních obvodů (polovodičové měniče). To vysvětluje, proč se vyskytují vyšší harmonické v TV, jaký je jejich vliv na vlastnosti sítě a zařízení v trakci [2].

Charakteristiky harmonických u napájení drážních vozidel ovlivňují přepětí (např. díky užitým polovodičům) v napájecím obvodu (v trakčním vedení a ve zpětném obvodu) a také celkovou stabilitu tohoto systému. Za účelem dosažení kompatibility elektrické soustavy v ustálených a dynamických podmínkách je nezbytné, aby byly přepětí harmonických omezena pod kritickou hodnotu. To z důvodu, že v trakčním systému jsou aplikovány ochrany hlídající podpětí, přepětí, nadproudy. Bez jakékoliv korekce přepět'ových pulsů by docházelo k neustálému přerušování provozu vlivem vybavování ochranných prostředků. Z hlediska provozu je neustálé přerušování spojené s přepětím více kritické než z hlediska bezpečnosti. Přepětí v systému střídavé trakce vznikají více způsoby:

- Přepětí vyvolána harmonickými.
- Přepětí vyvolána nestabilitou systému.

Přepětí vyvolána harmonickými

Přepětí vyvolané harmonickými vznikají především od statických střídačů s řízením fázového úhlu, ale i s nucenou komutací, které jsou instalovány na drážních vozidlech a v napájecích zdrojích pevných trakčních zařízení. Svými vlastnostmi vytvářejí harmonické proudy a napětí neboli spektra napětí a proudu, které mohou být reprezentovány jako zdroje proudu či napětí. Každý měnič kombinovaný s pasivními prvky vykazuje chování s vnitřní impedancí.

V důsledku rezonance přenosových vedení a kabelů s užitím pasivních součástí filtrů dochází také k zesílení harmonických přiváděných měniči do TV. Napájecí soustava má rezonanční špičky způsobené svými rozloženými parametry (indukčnost a kapacita), která se mění v závislosti přítomnosti hnacích jednotek. Zesílení harmonických může vést k výraznému přepětí buď v místě vozidla nebo na úplně jiném místě v síti. U vozidel se čtyřkvadrantovými měniči se mohou harmonické proudy v důsledku rezonančních jevů zvýšit v napájecí síti až třikrát [1].

Přepětí vyvolána nestabilitou systému

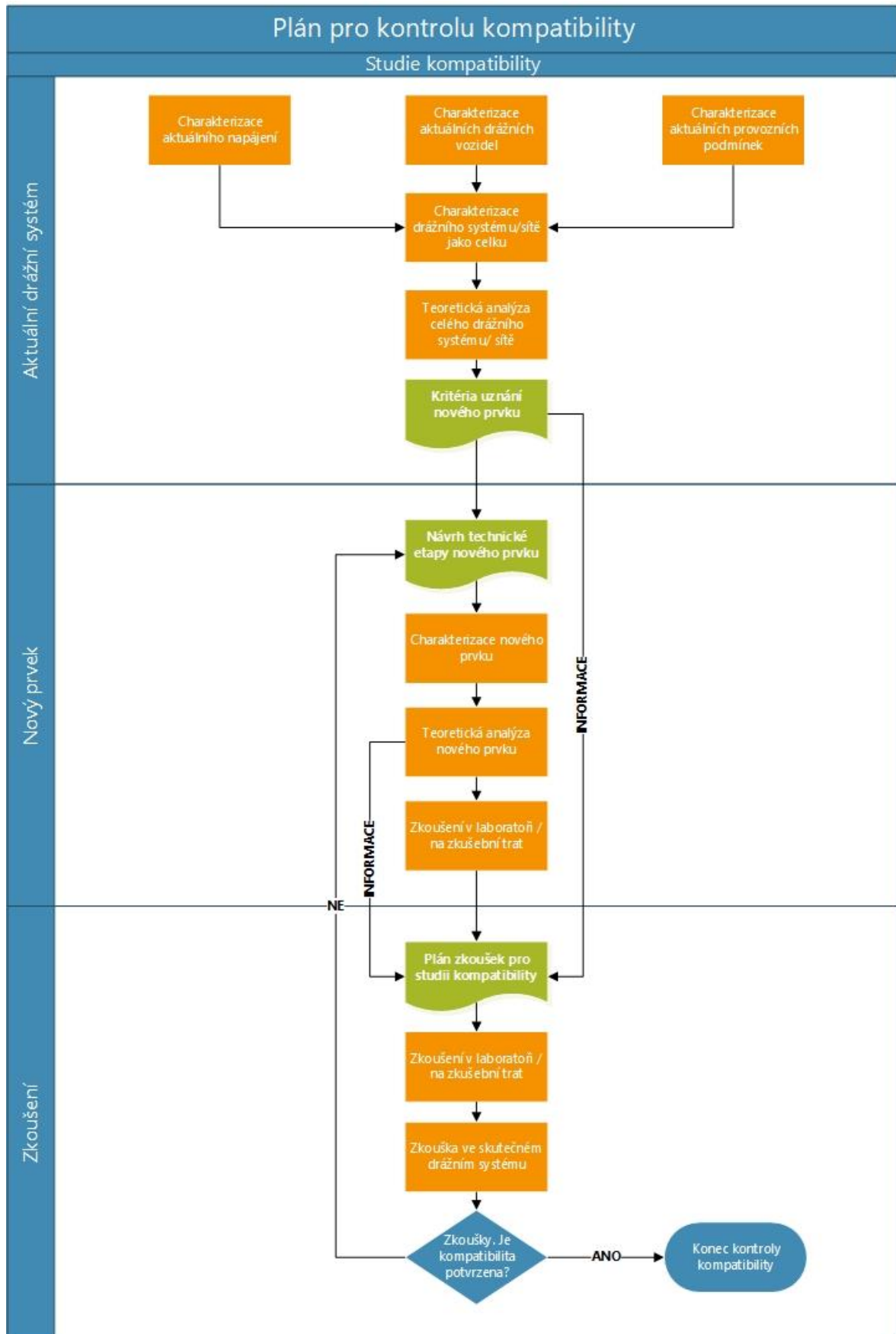
Přepětí vyvolané nestabilitou vzniká důsledkem schopnosti přenosu energie z jedné kmitočtové složky spektra do jiné. Moderní drážní vozidla se střídačovým pohonem a pomocné systémy jsou aktivní prvky, které do značné míry toto chování umožňují. Za účelem dosažení stability systému musí být jednotky vyladěny a vlastnosti impedance pasivních součástí musí být optimalizovány, aby se dosáhlo za všech okolností stabilních vlastností systému. V nestabilní soustavě způsobují hodnoty napětí a proudu výpadky ochranných prvků [1].

1.1.5 Kompatibilita systému

Pro správnou funkci všech zařízení v systému se musí provádět studie kompatibility a veškerá nová zařízení (nová vozidla, nové součásti infrastruktury) musí být v souladu s již stávajícími hnacími jednotkami a napájením. Účelem této studie je eliminování přepětí

v systému za jakýchkoliv situací a ochrana před vznikem nežádoucích vlivů, které byly popsány výše. Postup kontroly kompatibility popisuje vývojový diagram, který platí jak pro drážní vozidla, tak také pro pevné součásti zařízení a musí být schválen všemi zainteresovanými stranami, jako jsou [1]:

- Vlastník stávající infrastruktury nebo správce infrastruktury.
- Provozovatel stávající dopravy.
- Kupující / vlastník nové hnací jednotky nebo zařízení infrastruktury.
- Výrobce/dodavatel nové hnací jednotky nebo zařízení infrastruktury.



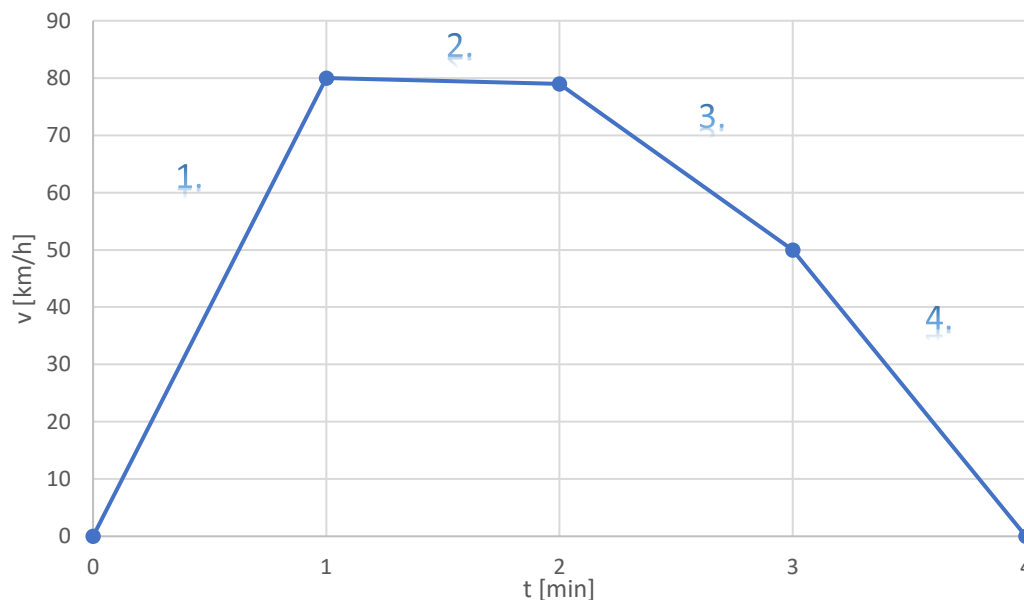
Obr. 2: Postup studie kompatibility návrhu nového zařízení pro TV [1]

1.2 ČSN EN 50 163

Tato evropská norma stanoví základní charakteristiky napájecích napětí trakčních vedení, včetně pomocných zařízení napájených z trakčního vedení a pevných trakčních zařízení. Dále stanoví základní charakteristiky napájecích napětí drážních vozidel. Tato kapitola je podrobněji popsána níže v kapitole 4.

1.3 Fyzikální a technická podstata problému

Jelikož se tato práce zabývá problematikou rekuperace, je důležité nastínit všechny aspekty týkající se tohoto tématu. A to nejen jak, ale i kde rekuperaci v trakci využít. Trakční vozidlo, prochází čtyřmi fázemi pohybu. Fáze pohybu jsou znázorněny na Obr. 3 [1].



Obr. 3: Fáze pohybu vozidla [1],

Popis jednotlivých fází pohybu kolejového vozidla:

1. **Rozejzd** – zde jde o uvedení vozidla do pohybu na požadovanou rychlost. Jsou překonávány odpory, které kladou vozidlu překážku pro zrychlování a dosažení požadované rychlosti. V této fázi pohybu dochází k přeměně elektrické energie na energii mechanickou v trakčním zařízení lokomotivy. Během zrychlování je vhodné využít značných úspor, které spočívají v co možná nejlepším regulovaném řízení trakčního motoru [3].

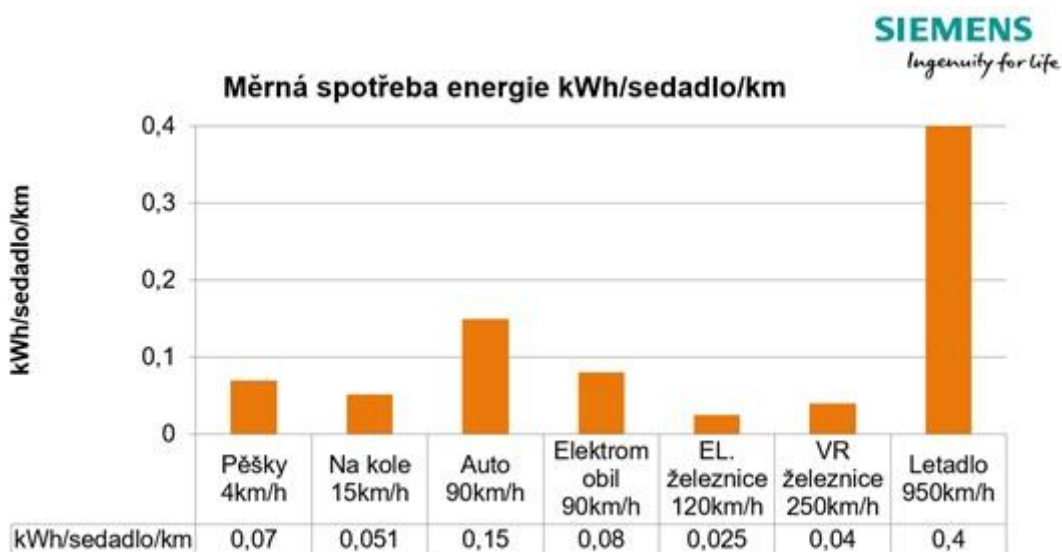
2. **Jízda konstantní rychlostí** – v této fázi pohybu trakčního vozidla je účelem udržovat konstantní rychlost a hladký průběh bez podélných rázů. Tažná síla vyvíjená lokomotivou kryje ztráty na jízdnicích odporech. Pro dosažení maximální úspory je důležitá maximální účinnost celého trakčního řetězce [1] [3].
3. **Výběh** – v okamžiku třetí fáze působí na vozidlo jízdnicí odpory a rychlost lokomotivy pozvolna klesá. Rychlost může ale i stoupat, pokud nastane dostatečně velké klesání, které překonává jízdnicí odpory. Nedochozí ke spotřebě energie, lokomotiva rychlost neudrží, ani nebrzdí. Tuto fázi je vhodné udržovat, pokud možno co nejdéle, za účelem zkrátit dobu jízdy tahem [1] [3].
4. **Brzdění** – v poslední zmíněné fázi dochází k brzdění trakční soustavy vlivem umělého zvyšování odporu, za účelem snížení rychlosti nebo k úplnému zastavení vozidla z fáze třetí. Zde je nejvhodnější příležitost pro přeměnu kinetické energie na energii elektrickou pomocí trakčního pohonu. Tato energie může být předána zpět do distribuční sítě nebo prostřednictvím trakční sítě dalšímu vozidlu, případně uchována pro opětovný rozjezd [1] [3].
5. **Stání** – při stání je nutné udržování tepelného komfortu pro cestující a zajištění energie pro pomocné pohony (palubní síť cca 5-10 kW na vozidlo, spotřeba vzduchu + netěsnosti, chlazení transformátoru, usměrňovače a měničů pomocných pohonů). Pro zajištění napájení těchto pomocných spotřeb musí být připojen hlavní transformátor a napájeny jeho ztráty naprázdno (cca 0,4 - 0,6 % P_n).

Pokud shrneme jednotlivý popis částí pohybu vlaku, největší využití rekuperace je v konečné fázi – brzdění a následně fázi počáteční – rozjezd [1].

1.3.1 Energetický potenciál brzdění

Energetický potenciál v dopravě je u železnic ku přepravnímu výkonu energeticky nejvýhodnější. To z důvodu, že valivý odpor ocelového kola lokomotivy je v porovnání s valivým odporem pneumatiky po asfaltu menší. Stejný případ platí pro porovnání aerodynamického odporu, kde odpor vlaku je nižší než u silničních vozidel, v přepočtu na

přepřevovanou hmotnost. V Obr. 4 můžeme vidět výhodu železniční dopravy z hlediska spotřebované energie na kilometr.



Obr. 4: Energetická náročnost jednotlivých druhů dopravy [4]

Nyní detailněji k fyzice. Pohybující se hmotný bod má kinetickou energii rovnou jeho hmotnosti a čtverci rychlosti. V případě trakčního vozidla do výpočtu navíc připočítáváme tzv. součinitel rotačních hmot ξ . Tento součinitel reprezentuje veškeré rotující části vozidla, což mohou být třeba převodovky, dvojkolí nebo generátory. Součinitel ξ je bezrozměrný a hodnota je dána konstrukcí vozidla [5].

Tab. 3: Hodnoty součinitele rotačních hmot

Druh vozidla	Součinitel rotačních hmot
El. lokomotivy	1,2-1,25
Osobní vozy	1,05
Nákladní vozy (prázdné)	1,12
Nákladní vozy (ložené)	1,04

Pro zjednodušení výpočtu se často užívá určitá hodnota pro celou soupravu, která je většinou blízká k hodnotě v poměru hmotnosti lokomotivy a vozů. Ta bývá v technické soustavě 1,07 pro osobní vlaky s osobními vozy a lokomotivou [5]. Kinetická energie vlaku:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m_{VLAK} \cdot v^2 \cdot \xi \text{ [J, kg, m/s]} \quad (1.1)$$

Kde:

- m_{vlak} – celková hmotnost vlak [t]
- v – rychlost vlaku [km/h]

- ξ – Součinitel rotačních hmot [5] [6] [7]

Pro další výpočty je použit modifikovaný vzorec využívaný v železniční praxi, který lze při použití obvyklých jednotek psát jako [6] [7]:

$$E_K = 1,072 \cdot \xi \cdot m_{CELK} \cdot V_{POC}^2 \cdot 10^{-5} [kWh, t, km/h] \quad (1.2)$$

Při hmotnostech vlaků (osobní vlak 45-55 tun na vůz, nákladní vlaky 1200-2500 tun, lokomotivy max. 22,5 tun na nápravu) a rychlostech blízcích se 200 km/h, je velikost pohybové energie, kterou je nutno soupravě při brzdění odebrat, v řádech 10-100 kWh. Teoretické hodnoty spotřebované energie jsou popsány v závěrečné kapitole 5.4 níže. Do průběhu přeměny energie jedoucího vlaku však vstupují další faktory, jako např. jízdni a traťové odpory, které spotřebují část energie [5] [6] [7].

Aby bylo možné dále vysvětlit danou problematiku, je vhodné zmínit, které faktory rekuperaci vozidel brání, a je nezbytné je překonávat. To, že jakékoliv vozidlo je během jízdy zpomalováno, ať už aerodynamickým odporem nebo valivým odporem, i trakční vozidla musí při rozjezdu a během jízdy překonávat odpory.

1.3.2 Jízdni a traťové odpory

Při jízdě na vozidlo působí trakční síly a odpory, z nichž jsou nejvýznamnější pro tuto problematiku odpory jízdni a odpory traťové [5] [6] [7] [8].

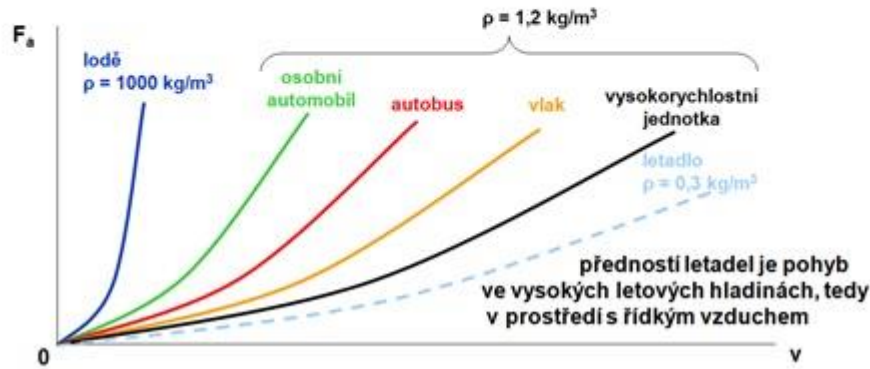
Jízdni odpor O_J [kN] obsahuje především:

- odpor smykového tření v ložiskách,
- odpor valivého tření mezi kolem a kolejnicí,
- odpor vzduchu.

Spotřeba energie k překonání odporu prostředí je úměrná 2. mocnině rychlosti:

$$\left(F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 \right)$$

Dalším důležitým faktorem je specifická hmotnost prostředí:



Obr. 5: Energetická náročnost dopravy v závislosti na rychlosti, F_a – aerodynamická síla, C_x – číselník tvaru (1,13), S – čelní plocha vozidla (8-12 m²) převzato z [4]

V trakci se značně využívá měrných veličin, proto se zde zavádí tzv. součinitel jízdního odporu O_J [N/kN], což je jízdní odpor vztažený na 1 kN tíhy vozidla jedoucí ustálenou rychlostí. Pro ten platí obecná rovnice [9]:

$$O_J = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (1.3)$$

Kde:

- a, b, c – koeficienty respektující jednotlivé složky tření
- V – rychlost [km/h]

Pro vyčíslení součinitelů těchto odporů se nejčastěji vychází z empirických vztahů, které jsou aplikovány dle reálných pokusů. V literatuře je možné najít více variant vztahů, které uvádějí hodnoty pro odpor čtyřnápravových osobních vozů, elektrické lokomotivy, ale i nákladních vozů. Součinitel jízdního odporu celkové vlakové soupravy (lokomotiva, vozy) je poté udána v poměru ke hmotnostem jednotlivých částí vlaku a je značena O_{jvlak} . Předmětem této práce však není přesné určení jízdního odporu. I přes to, že v závěru pro dosažení výsledků analýzy je nutné spočítat jízdní odpory, veškeré vstupní hodnoty byly převzaty z uvedených zdrojů [5] [6] [7] [8].

Traťový odpor, též značený O_T [kN] obsahuje v podmínkách především:

- odpor z oblouku,
- odpor ze sklonu trati.

Pro výpočty traťového odporu se používají měrné jednotky udávané v N/kN. Součinitel odporu z oblouku je podobně jako součinitel jízdního odporu udáván za pomoci empirických vztahů, které jsou rozdílně zaváděny. Pro dráhy s poloměrem oblouku r lze použít vztah:

$$O_{obl} = \frac{650}{r-55} [\text{N/kN, m}] \quad (1.4)$$

Součinitel odporu ze sklonu trati je kvůli malým sklonům možno považovat za číselně rovný sklonu trati s udaným v promile [5] [6] [7]:

$$O_{skl} = s [\text{N/kN, ‰}] \quad (1.5)$$

Kde s lze odvodit tak, že $O_{skl} = G \sin \alpha$ [N; N] - α je úhel stoupání a G tíha vozidla. Sinus α znázorňuje převýšení stoupání ku délce ² - h/l . Výsledný vzorec je následně $O_{skl} = G \cdot h/l$, což je po převedení na obvyklé jednotky $O_{skl} = h/l = s$ [N/kN, m, km, ‰] [5] [6] [7] [8].

Součinitel traťového odporu je poté:

$$O_T = O_{obl} + O_{skl} \quad (1.6)$$

Během jízdy při stoupání působí odpor ze sklonu proti jízdě vlaku a O_{skl} má pro výpočty kladnou polaritu a při klesání zápornou. Celkový trakční součinitel odporu, který působí na vlak během ustálené jízdy je [5] [6] [7] [8]:

$$O_{TRAK} = O_{jvlak} + O_T = O_{jvlak} + O_{obl} + O_{skl} [\text{N/kN}] \quad (1.7)$$

Pro překonání trakčního odporu na určitou vzdálenost l je potřeba vyvinout energii E_O , která se dá při uvažování konstantní rychlosti psát takto:

$$E_O = O_{TRAK} \cdot m_{VLAK} \cdot g \cdot l [J; \frac{N}{N}, kg, m/s^2, m] \quad (1.8)$$

² Převýšení, sklon trati je možné dělit do čtyř skupin, dle procentuálního náklonu. Malý sklon považujeme do 0,5 %, sklon 1-1,5 % je označován jako kopcovitý. Velmi kopcovitá trať je považována do 2,5 % a rychlodráhy překonávají až 3,5 % sklon.

pro použití v železniční praxi spíše využijeme tento vztah:

$$E_0 = 2,724 \cdot m_{VLAK} \cdot O_{TARK} \cdot l \left[kWh, \frac{N}{kN}, t, km \right] \quad (1.9)$$

1.3.3 Zastavovací brzdění

Brzdění vlaku z rychlosti počáteční na rychlost nulovou se nazývá zastavovací brzdění. Vycházíme z následujících předpokladů [5] [6] [7] [8]:

- Výchozími parametry pro zastavovací brzdění je rychlost vlaku na začátku brzdění v_0 a zábrzdna vzdálenost l_B
- Pro jednoduchost uvažujeme konstantní zpomalení po celou dobu brzdění

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot l_B} \quad [m/s^2, m/s, m] \quad (1.10)$$

Tím zavedeme konstantní celkovou brzdnu sílu

$$F_{Bcelk} = m \cdot a \cdot \xi \quad [kN, t, m/s^2, -] \quad (1.11)$$

Celková brzdna síla v sobě obsahuje i účinky trakčního odporu O_{TRAK} , proto brzdna síla F_B , která musí být odvozena vlakovými brzdami, je dána pro každou rychlost rozdílem:

$$F_B = F_{Bcelk} - O_{TRAK} \quad [kN] \quad (1.12)$$

V návaznosti na brzdící sílu lze vyvodit pro každý okamžik brzdění brzdny výkon P_B

$$P_B = F_B \cdot v \quad [kW; kN; m/s] \quad (1.13)$$

Během elektrodynamického brzdění je nutno akceptovat tato omezení:

- Omezení ohledně brzdné síly
- Omezení ohledně brzdného výkonu

Při použití pouze elektrodynamické brzdy je brzdna síla omezena maximální adhezní silou, která je dána adhezní tíhou brzdícího vozidla a součinem adheze. Brzdnou sílu není možno přenést přes kola pomocí elektrodynamické brzdy, pokud je potřebná brzdna síla větší než maximální adhezní síla. Je třeba zvýšit brzdnou dráhu, nebo navíc použít i jiné vlakové brzdy [5] [6] [7] [8].

$$F_B = F_{EDB} \leq F_{adh.max} = \mu_{max} \cdot m_{adh} \cdot g \quad [kN; -; t; m/s^2] \quad (1.14)$$

μ_{\max} – součinitel adheze při brzdění se udává maximálně 0,15, aby mohl být započítán do brzdících procent během elektrodynamické brzdy. Toto určení vychází z požadavků železnic i TSI směrnice pro kolejová vozidla s ohledem na bezpečnost **Chyba!**
Nenalezen zdroj odkazů..

Tab. 4: Hodnoty součinitele adheze [6]

Provozovatel	Součinitel adheze μ_a [-]	
	Rozjezd	Brzdění
ČD	0,2	0,12-0,15
DB	0,24	0,15
ÖBB	0,23	0,12

Nicméně v praxi a během reálného provozu nabývá adhezní součinitel vyšších hodnot, ale s měnícím se podnebím a změnou povrchu koleje dochází k poklesu adheze. Ve výpočtech jsou uvažovány hodnoty krajní.



Obr. 6: Porovnání kolejí s rozdílnou adhezí, převzato z [4]

$$P_{EDB} = \frac{F_{EDB} \cdot V}{3,6} [kW; kN; km/h] \quad (1.15)$$

$$P_{EDB} = \frac{F_{adh.max} \cdot V}{3,6} [kW; kN; km/h] \quad (1.16)$$

Brzdňý výkon P_B je dán součinem brzdňé síly a okamžitě rychlosti trakčňího vozidla. Pokud je brzdňá síla omezena adhezí, je okamžitý výkon P_{EDB} omezen maximální adhezní silou. Maximální krátkodobý el. výkon elektrodynamické brzdy je také omezen parametry soustrojí motor (generátor) – měnič [5] [6] [7] [8].

1.3.4 Spádové brzdění

Spádové brzdění slouží k udržování konstantní rychlosti vlaku. To nastává při jízdě z klesání, kdy uzpůsobený sklon trati urychluje vlak nad jmenovitou rychlost. V těchto případech je odpor ze sklonu záporný, absolutní hodnota při dovolené rychlosti je větší než jízdní a traťové odpory, které působí proti pohybu vlaku. Na tratích s dlouhými spády lze rekuperací dosáhnout významných energetických úspor [5] [6] [7] [8].

$$O_{TRAK} = (O_{jvlak} + O_{obl} + O_{skl}) < 0 \quad (1.17)$$

Při stálém záporném trakčním odporu musí vozidlo brzdit konstantní silou F_B , aby udrželo konstantní rychlost. Pokud vlaková souprava jede ze spádu, působí na vlak urychlující síla:

$$F_O = -(O_{jvlak} + O_{obl} + O_{skl}) \cdot m_{vlak} \cdot g \cdot 10^{-3} [\text{kN}, \text{N/kN}, \text{t}, \text{m/s}^2] \quad (1.18)$$

Při jízdě ze spádového místa musí samozřejmě proti této síle, která urychluje vlakovou soupravu, působit opačná brzdná síla $F_B - F_O$ [5] [6] [7] [8].

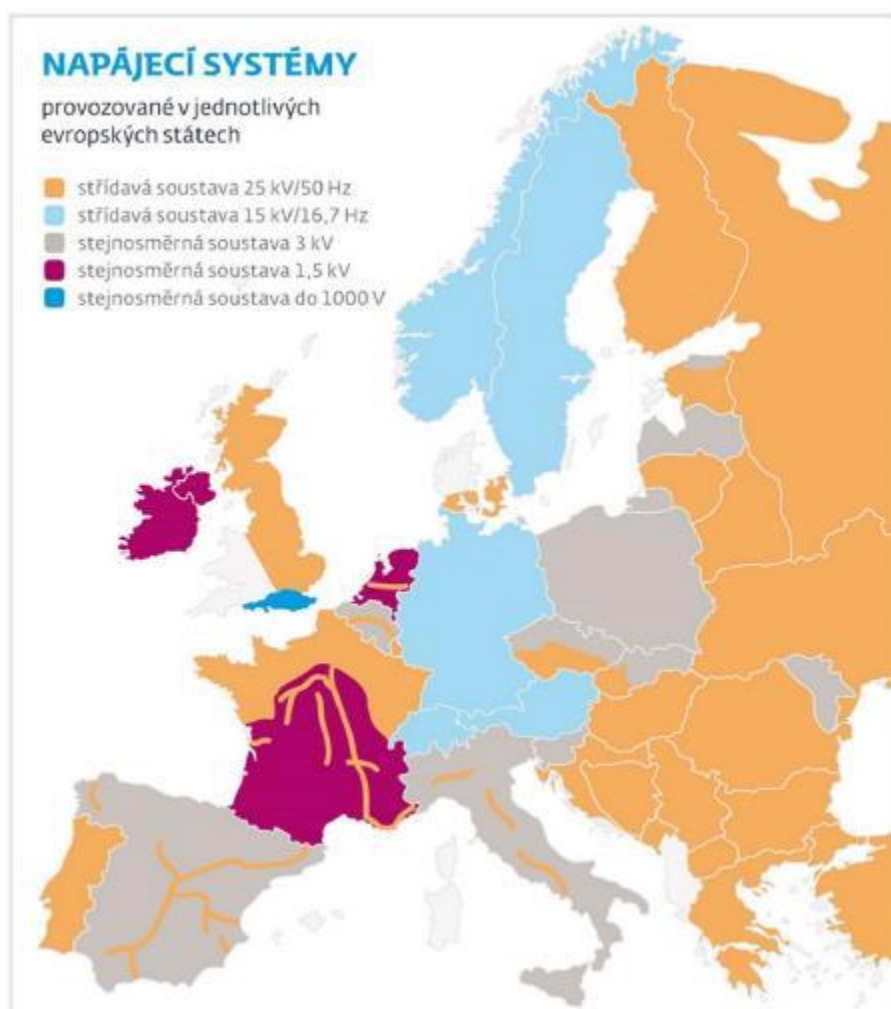
1.4 Koncepce napájecí soustavy TV

Funkcí TV je zásobovat vlaky elektrickou energií [10] [12].

Ačkoli je tato práce orientována zejména na rekuperaci trakčního systému napájení 25 kV, je z pohledu problematiky vhodné uvést alespoň obecnou charakteristiku napájecích soustav, které byly využívány v počátcích, které jsou využívány nyní, a proč dochází ke změnám a vývoji napájení trakčního vedení. Vhodnost každého systému z dále zmíněných, procházela dobou, a postupným vylepšováním a získáváním poznatků o problematice daného systému. A byly aplikovány nové trendy nejen ze strany napájení. Dříve používané trakční napájecí systémy přežívají až do dnešní doby a TV lze rozdělit do dvou základních typů. Jde o stejnosměrné a střídavé napájecí systémy. Na území České republiky se můžeme setkat se čtyřmi napěťovými hladinami trakční soustavy [10] [12].

- Stejnosměrná soustava 1,5 kV (Bechyně – Tábor)
- Stejnosměrná soustava 3 kV
- Střídavá soustava 15 kV; 16,7 Hz (Retz – Znojmo (v režii ÖBB))
- Střídavá soustava 25 kV; 50 Hz

Každá ze soustav TV má svá pro i proti, která jsou dána především dobou vzniku a tím i dostupností technologií dané doby. Nejvíce se však setkáme s napájením stejnosměrným o hodnotě 3 kV a střídavým TV o parametrech 25 kV/50 Hz. V pozadí a na ústupu se zde však stále vyskytuje stejnosměrné napájení o hodnotě 1,5 kV. Podobně tomu tak je i evropském měřítku, kde zastoupení zmíněných systémů je ve stejném poměru. Nicméně pro všechny nové, modernizované nebo obnovené železniční systémy musí být použita jedna ze čtyř napájecích soustav. Toto nařízení určuje platná směrnice TSI Energy [12] [13] [14].



Obr. 7: Napájecí soustavy v Evropě, převzato z [15]

Samotné napájení trakčních zařízení se neskládá pouze z vodičů, které se dotýkají sběračů lokomotiv. Napájení TV obsahuje trakční měnírny (u DC napájení) nebo trakční transformovny (u AC napájení), které jsou připojeny k distribuční síti. V transformovných

nebo měnících dochází k transformaci napětí na požadovanou úroveň nebo případně k přeměnění napětí dle užitého systému TV. Až za transformovnými jsou připojeny jednotlivé úseky TV [10] [13] [14].

1.4.1 Stejnoseměrná soustava 1,5 kV / 3 kV

Stejnoseměrná soustava trakčního napájení o hodnotě 1,5 kV byla jedna z prvních významně využívaných v Evropě. V České republice byl tento systém nasazen ve 20. letech minulého století pro elektrifikaci pražského železničního uzlu s cílem dostat se s elektrickou trakcí až do Plzně. Dnes už je však považován za přežitek, který pozbývá na několika úsecích Evropy, např. v Holandsku, jižní Francii, České republice. Francie se pro tento systém rozhodla během první světové války, kdy proti Francii stálo Německo a Francie tak chtěla znepříjemnit válečnou německou logistiku při případném vstupu na území galského kohouta. Ohledně domácího zastoupení je stále v úseku trati č. 202 Tábor – Bechyně. Napájecí systém 1,5 kV je shodný se systémem 3 kV kromě výše napěťové hladiny [10] [12] [13] [14] [16].

Postupem času byla tato soustava přepínána na vyšší napětí z důvodu vyšších nároků na přenášený výkon. Zvýšením hladiny napětí, zde byly odebírány menší trakční proudy. To ale až po rozšíření znalostí zvládnutí vysokého napětí na trakčních motorech. Důvodem byly zejména izolační materiály pro dlouhodobou a spolehlivou elektrickou pevnost. Problémem byla a stále je vlhkost a relativně vysoké tepelné a mechanické namáhání izolace. Hodnota na komutátoru motoru reálně dosahovala 1,5 kV a izolační velikost 3 kV. Dalším pomocným krokem byla schopnost přeměnit trojfázový proud energetické sítě v měnících na stejnoseměrný systém, a tím použít jednopólové trolejové vedení. V úplných počátcích přeměna problém nebyla, protože každá elektrická dráha měla svoji elektrárnu s dynamem. Přeměna trojfázového proudu se začala řešit až v 50. letech 20. století pomocí ignitronových usměrňovačů. Výhodou těchto soustav bylo zapojení trakčních motorů do série, což prokazovalo lepší vlastnosti při rozjezdu vlaku [10] [12] [13] [14] [16].

V dnešní době je tento systém znovu vytlačován, protože naráží na své limity a výkon není dostačující. Jedním z nedostatků je maximální proud a následný úbytek napětí jak v troleji, tak především ve zpětném vedení – ocelových kolejnicích. Slabinou jsou také trolejové sběrače, které jsou konstruovány s masivními hlavicemi pro přenos cca 2500 A pro současné lokomotivy a vysokorychlostní jednotky [10] [13] [14] [16].

Z hlediska mechanické konstrukce trakčního vedení je přítlak sběrače k troleji omezen na 100 N. Další nevýhoda oproti střídavému systému je masivní vedení, kde měděné vodiče mají průřez běžně 150 mm². Přenos velkého proudu mezi masivním trakčním vedením a těžkou ližinou sběrače představuje velký problém při vysokých rychlostech větších než 160 km/h. Stejnoseměrné systémy svojí impedancí trolejového vedení a úrovní napěťové hladiny se vyznačují vysokými úbytky napětí a ztrátami na vedení. Dalším negativem, který plyne z předchozí nevýhody je hustější rozmístování napájecích stanic – přibližně po 20–25 km. Nepříznivá situace vysokých ztrát na vedení je kompenzována tzv. oboustranným napájením, kde traťové úseky jsou napájeny z protilehlých trakčních měníren současně. Tím je zajištěna vyšší spolehlivost napájení a lepší rozložení zátěže na daném úseku [10] [13] [14] [16].

Nicméně tento systém je stále hojně využíván nejen v České republice. Celá severní část republiky je stále provozována na síti 3 kV z historických důvodů (vybudováno v počátcích 50. let). Je tomu tak i z důvodu vozového parku dopravců, kteří vlastní nemalé množství lokomotiv, které jsou o poznání jednodušší konstrukce, než lokomotivy pro střídavou síť a tím i cenově výhodnější. Celoplošný přechod, zrušení-přestavba tohoto systému by vyšlo na obrovské investice a odstavení doposud funkčních lokomotiv [10] [13] [14] [16].

Shrňme si stručně výhody a nevýhody:

- + Symetrické zatížení sítě.
- + Jednoduchost, nižší cena a hmotnost lokomotiv.
- + Možnost realizace dvoustranného napájení.
- + Rekuperace mezi vozidly.

- Problém s bludnými proudy.
- Vzdálenost trakčních měníren pouze do 25 km.
- Nelze jednoduše rekuperovat do distribuční sítě.
- Komplikovanější řešení měníren oproti AC systému.
- Problém vypínání stejnosměrného proudu a s tím spojené zhašení oblouku.
- Zatíženo přenosem vysokých proudů > vysoké úbytky na vedení = vysoké ztráty.
- Masivní měděné vodiče, spotřeba materiálu.

- Vyšší nároky na stavbu konstrukčních prvků pro vedení TV (hmotnost vodičů).
- Nemožnost zvyšovat napětí a tím výkon vozidel.
- Vysoký přítlak sběrače pro přenos vysokých proudů.

1.4.2 Střídavá soustava 15 kV / 16,7 Hz

Tento napájecí systém o 15 kV s frekvencí 16,7 Hz, též nazýván 15 kV 2/3 Hz je hojně rozšířen v sousedních německy mluvících zemích (Německo, Rakousko a Švýcarsko) a dále je využíván ve skandinávských zemích Norska a Švédska, viz Obr. 7. Nicméně na trati Znojmo – Šatov – st. Hranice s Rakouskem a zkušebního okruhu v Cerhenicích ho však jinde na českém území nenalezneme [10] [13] [14] [16].

Vznik této soustavy byl koncipován na počátcích 20. století za účelem dosažení zvýšení napětí a použití AC proudu na elektrické trakci. Snížení frekvence se ukázalo jako velice přínosné, protože je zlepšena komutace jednofázových trakčních motorů bez nutnosti použít usměrňovače a třetinový kmitočet lze vytvořit pomocí rotačních měničů na bázi šestipólového synchronního motoru. Při porovnání frekvence 50 Hz a 16,7 Hz bylo zjištěno, že vyšší kmitočet je krajně nevhodný pro použití strojů s komutací, kde docházelo k vysoké poruchovosti na základě jiskření. Zlepšená komutace není jedinou výhodou, která následovala. Snížila se i impedance trakčního vedení, a hlavně se zvýšil přenášený výkon díky pětinasobnému nárůstu napětí oproti stejnosměrnému TV. Poklesl také počet napájecích stanic, protože průřez trolejového vedení postačí menší a nedochází k razantním ztrátám a úbytkům napětí. Rozteč jednotlivých napájecích stanic je mezi 30–80 km, podle vytíženosti daného traťového úseku. V případě užití AC systému mohou napájecí stanice pracovat paralelně, tedy spojitě, což znamená, že lze budovat trakční vedení bez neutrálních polí (oddělovací úseky), které ale slouží pro střídání fází v systému 25 kV/50 Hz. Zajištěno je nepřerušované napájení trakčních vozidel, a tudíž téměř stoprocentní jistota úspěšné rekuperace [13] [14] [16].

Pro nasazení je nutné budovat vlastní jednofázové přenosové vedení VN, které bude nezávislé na 3f distribuční síti. Tím se zajistí bezproblémová rekuperace, která nebude tížit distributora veřejné sítě. Pokud by tento systém nebyl napájen z vlastních jednofázových elektráren, museli by být rozmístěny polovodičové/rotační měniče, které jsou připojeny na veřejnou distribuční síť. V tomto případě však už odpadá jednoduchost zavedeného systému, jak z pohledu přeměny, tak z pohledu rekuperace. Dnes to ale není problém a běžně se tak

v praxi děje. Vlastní výrobu elektrické energie se sníženým kmitočtem v dnešní době používá Německo, Rakousko naproti tomu Švédsko a Norsko přistoupilo na napájení TV sníženého kmitočtu transformací z energetické sítě třífázového rozvodu. Kromě bezproblémové rekuperace výše zmíněné bylo dalším důvodem použití dříve aktuálních komutátorových motorů a regulace změnou odboček na transformátorech. Z těchto důvodů nebylo třeba použít odporovou regulaci [10] [13] [14] [16].

- + Vyšší napěťová hladina – menší ztráty, menší průřez vodiče.
- + Vzdálenost napájecích stanic až 80 km.
- + Lehce proveditelná rekuperace při použití vlastní sítě.
- + Případná nezávislost na distribuční síti.
- + Menší impedance vedení než kterýkoliv jiný systém díky frekvenci.
- + Dvoustranné napájení – menší úbytky napětí.
- + Vhodné pro stroje s komutací (ačkoliv v dnešní době už vytlačovány).

- Výstavba vlastní specifické napájecí sítě o sníženém kmitočtu.
- Těžší magnetické obvody transformátorů.
- Vzájemné rušení sdělovacích zařízení a zabezpečovací techniky.

1.4.3 Střídavá soustava 25 kV / 50 Hz

Střídavá soustava 25 kV je jedna ze dvou nejrozšířenějších trakčních soustav v ČR. V dnešní době je většina jižní oblasti pokryta touto soustavou a severní část patří stejnosměrnému systému. V Obr. 7 můžeme vidět, že tento systém se nachází na většině území, která začala s rozvojem trakčních vedení v pozdější fázi a spojila tak třeba dosavadní stejnosměrný systém. Jsou jimi např.: Maďarsko, Dánsko, Bulharsko a další jižní státy [13] [14] [16].

I pro tuto střídavou soustavu platí stejné podmínky jako pro předchozí systém sníženého kmitočtu. Přenosové schopni jsou velmi dobré, v porovnání se stejnosměrným systémem. Soustava je vhodná pro napájení vozů s výkonem okolo desítek MW, získává jasně navrch nad DC vedením, kde přenosová schopnost je max. 7–9 MW. Stejná frekvence jako má DS je další výhodou, kde trakční transformovny lze přímo připojit a netřeba snižovat kmitočet pomocí frekvenčních měničů. Průřezy vodičů jsou menší, a procházející proud je

až 4x nižší, v řádu stovek ampér, oproti DC systému 3 kV. Tato výhoda v sobě nese i značná úskalí, díky kterým je provoz a následná rekuperace ztížena [13] [14] [16].

AC trakce je výhradně řešena jako paprsková, tudíž nelze úsek napájet z obou stran kvůli nežádoucím přetokům vyrovnávacích proudů mezi napájecími stanicemi. I tak je rozmístění NS okolo 40-60 km od sebe, díky mnohem nižšímu úbytku napětí. Další aspektem problematiky je nesymetrické zatěžování DS kvůli jednofázovému vedení trakčních měníren anebo odběr jalového výkonu při použití starších lokomotiv, které nepoužívají čtyř kvadrantové měniče a s tím spjatý problém s deformací napětí vlivem vyšších harmonických složek napětí [10] [13] [14] [16].

- + Oproti jiným soustavám malé ztráty na vedení.
- + Rozsah napájecích stanic 40-60 km.
- + Menší průřez trolejového vedení, proud do A pro konvenční železnici.
- + Jednoduché řešení transformace napětí, bez použití frekvenčních měničů.
- + Dostatečný přenášený výkon.

- Nesymetrické zatížení třífázové sítě.
- Nutné střídání fází, vznik neutrálních úseků.
- Špatný účinník a deformace odebíraného proudu u vozidel s neřízenými usměrňovači.
- Vyšší impedance než 15 kV-nižší vzdálenost mezi TNS.

1.4.4 Interoperabilita

Vznik mnoha systémů napříč Evropou a jinými světovými kontinenty přinášel mnoho problémů s propojením a znesnadňoval tak dopravu po železnici. Docházelo tak ke komplikacím, které zpomalovaly rozvoj mezinárodní železniční dopravy. Každý stát používal jiný systém, jiné normy, jiná pravidla. Postupem času se docházelo k závěrům, že je potřeba co možná nejvíce sjednotit a umožnit nepřerušovaný a hladký průjezd vlaků napříč státy s možností ujet co nejdelší vzdálenost [13].

Došlo tak k vytvoření tzv. technické specifikace pro interoperabilitu, která byla jedna ze zásadních počinů ve směru sjednocení. Známé též ve zkratce TSI (z anglického „Technical Specification for Interoperability“). TSI se člení na čtyři základní strukturální

hlediska a to: Energie, Infrastruktura, Řízení a zabezpečení a Kolejová vozidla. TSI uvádí požadavky na jednotlivé oblasti, které jsou stanoveny právě v technických specifikách pro interoperabilitu. Pod touto mezinárodní specifikací spadají zákony v jednotlivých státech v návaznosti na technické normy anebo mezinárodní železniční dohody [13].



Obr. 8: Hierarchie předpisů v železniční dopravě [13]

Směrnice TSI stojí na vrcholu všech norem a pravidel a usnadňují tak přechod ze starých vnitrostátních železničních systémů na nový sdílený evropský standart, řízený z velké části společnými předpisy EU. Pod technické specifikace pro interoperabilitu se váží společné normy evropské (EN), které jsou následně přejímány jednotlivými členskými státy jako normy národní, nebo též harmonizované. V ČR označované jako ČSN EN. Posledním možným stupněm jsou vnitrostátní pravidla, která mohou být někdy natolik klíčová, že nadřazené evropské normy jsou do jisté míry přizpůsobeny potřebám jednotlivých států [13].

Pokud je trať označována jako TSI, značí tak vysokorychlostní nebo konvenční trať, která se odlišuje od rychlosti drážních vozidel. Vysokorychlostní trať (též značeno HS) jsou vybaveny pro rychlost drážních vozidel nad 200 km/h a dráhy konvenční (CR) jsou tratě pro nižší rychlosti. Trať značená jako HS nebo CR je součástí transevropské železniční sítě a odpovídá požadavkům příslušných technických specifikací pro interoperabilitu [13].

Norma ČSN EN 50 388 dále uvádí kategorie vysokorychlostních a konvenčních tratí, které se liší zpravidla povolenou maximální rychlostí vlaků osobních a nákladních.

2 Technické problémy na straně vozidel

Tato kapitola detailněji poukazuje na problematiku možnosti rekuperace elektrické energie z energie kinetické, a to od samého jádra (lokomotivy), kde přeměna vzniká a putuje následně dále trakčním vedením přes transformovny až do distribuční sítě. Nicméně v první kapitole nezaznělo, jak přesně a které konstrukční části elektrické lokomotivy umožňují vytvořit elektrickou energii z energie kinetické během procesu brzdění. Proto pro nejlepší pochopení a vytvoření uceleného pohledu na věc je vysvětlen princip přeměny energie a následně vytyčeny vzniklé problémy u lokomotiv pro střídavou trakci.

2.1 Princip rekuperace elektrické energie

Ačkoliv je tato diplomová práce zaměřena na systém střídavé trakce s napětíovou hladinou 25 kV, nerad bych tak opomínal na stále již v hojné míře využívaný systém stejnosměrný, který střídavému systému v ČR předcházela a v určitých ohledech střídavé trakce utvářela cestu svým postupným vývojem zejména v oblasti polovodičových součástek a výkonových měničů. Vysvětlení principu přeměny energie (rekuperace) do sítě u lokomotiv napájených DC napětím, stručně pro kontrast, přichází vhod jako nezbytná nutnost.

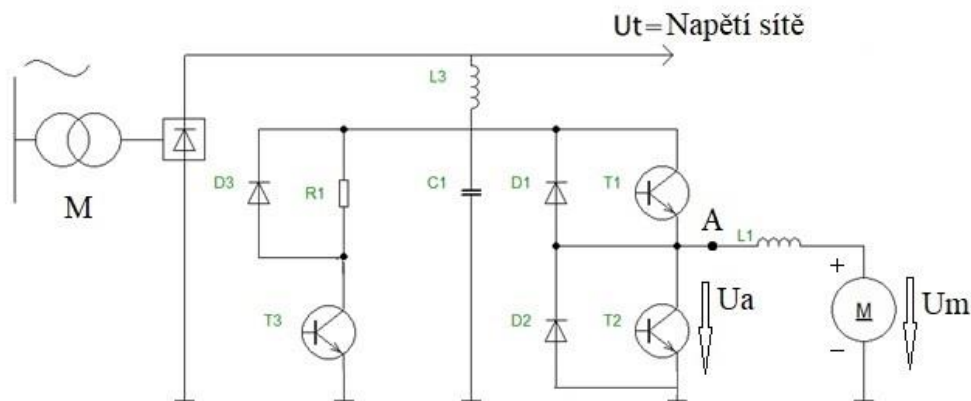
2.1.1 Vozidlo na soustavě DC 3 kV s DC pohonem

Tato konstrukce vozidel je jedna z nejstarších, která se vyskytovala v počátcích výzbroje elektrických lokomotiv. Zprvu nejzákladnější technika obsahovala strukturu pro pouhý pohon, za účelem přeměnit elektrickou energii na mechanickou. Srdcem byly stejnosměrné sériové trakční motory, které byly řízeny pomocí stupňové odporové regulace. Tyto motory se vyznačovaly tzv. měkkou otáčkovou charakteristikou, což znamenalo postupné zvýšení rychlosti i při okamžité změně napětí. Lokomotiva prováděla rozjezd pomocí postupného vyřazování rozjezdových odporů zapojených do série s trakčními motory a zvyšováním napětí na motoru. V tomto případě se jednalo o řízení motoru bez rekuperace s vysoce nevhodným řízením [17] [18].

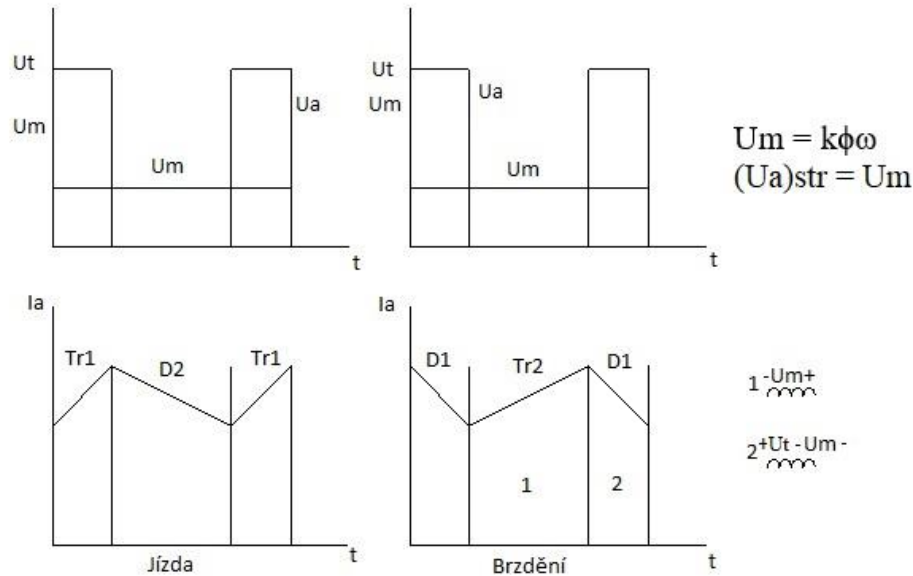
S masivním rozvojem výkonové elektroniky, zejména polovodičových součástek (tyristory, GTO, IGBT, ...), byl odstartován vývoj řízených usměrňovačů a pulsních měničů. To vneslo nové možnosti plynulé regulace cizí buzených stejnosměrných motorů, které jsou

pro elektrickou trakci vhodným zdrojem regulovaného momentu. Dříve, bez možnosti plynulé regulace tento motor nebylo možné řídit z důvodů jeho vlastností. Oproti DC sériovému motoru má cize buzený motor tvrdou otáčkovou charakteristiku. I malé změny napětí v motoru vyvolávají velké změny procházejícího proudu, a proto bylo nutné zajistit plynulost změny napětí. Tento způsob se stal hospodárnějším a ekonomičtějším oproti stupňové regulaci, kde docházelo ke ztrátám v odpornících a je využíván dodnes v zařízeních s DC motory. Nutno však podotknout, že DC pohony v lokomotivách jsou dnes historií a jejich provoz je na „dožití“ [17] [19].

Charakteristickými prvky řídicí DC motory patří snižující a zvyšující pulsní měnič. Tyto měniče plynule regulují napětí a dochází tak k plynulému zvýšení momentu pohonu. V opačném případě zvyšující pulsní měnič umožní změnu směru toku energie a lze pohon provozovat jako zdroj, který přenáší energii do troleje. V Obr. 9 můžeme vidět spojení obou měničů, které se využívají pro řízení DC pohonu na DC síti [17] [20] [21].



Obr. 9: Blokové schéma DC pohonu na 3 kV systému s možností rekuperace [18]



Obr. 10: Režim jízda a brzdění DC pohonu/spínání step up/down měniče [18]

2.1.2 Vozidlo na soustavě DC 3 kV s asynchronním pohonem

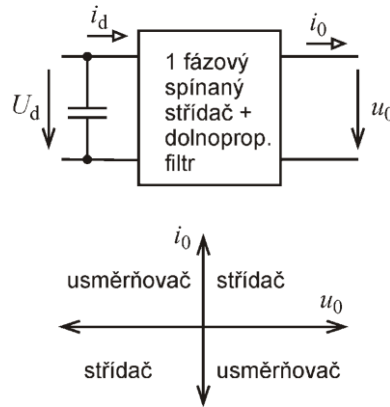
Od začátků, kdy byl objeven asynchronní motor bylo zamýšleno využít příznivých vlastností těchto pohonů v elektrické trakci. Asynchronní motory s kotvou nakrátko se vyznačují svojí jednoduchostí konstrukce a vysokou odolností oproti motorům stejnosměrným. Pohony s asynchronními motory neobsahují komutátor a uhlíkové kartáče, které vyžadují pravidelnou údržbu a dochází k mechanickému opotřebení. Údržba asynchronního motoru je více než snadná a snad pouhou „nutností“ je domazávat a kontrolovat funkci ložisek. Interval údržby je vyměřen mezi 500 000 – 1 000 000 km.

Nevýhodou v začátcích byla nemožnost plynulého a hospodárného řízení otáček motoru. Možnou volbou řízení otáček je společná změna napájecího napětí a napájecího kmitočtu, tato metoda se ale v trakci nepoužívá. Mezi možnosti, jak řídit tyto pohony patří vektorové a skalární řízení, nebo také přímé řízení momentu. Možnost řídit asynchronní motor byla proveditelná až po rozvoji polovodičových vypínatelných součástek a s příchodem proudových, tak i napěťových měničů začaly být pohony tohoto typu hojně využívány [22].

2.1.2.1 Napěťový střídač

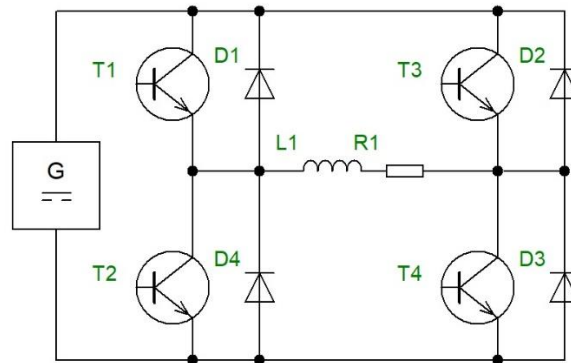
Střídače obecně jsou obvody se vstupní stranou stejnosměrnou a s výstupní stranou střídavou. Tím jsou vhodným celkem pro řízení asynchronního motoru na DC troleji.

Obecně jsou střídače čtyř kvadrantové a dle úhlu řízení lze přenášet energii ze stejnosměrné strany na střídavou, tak i opačně. To znamená, že lze toto zařízení provozovat jako střídač nebo i jako usměrňovač. Střídače typicky využívají součástky s vlastní komutací, které obsahují spínač pro snadné přerušení proudu ve větvi, např. tranzistory, tyristory vypínatelné řídicí elektrodou (GTO a IGCT), tyristory s komutačním obvodem [23].



Obr. 11: Funkce střídače [23]

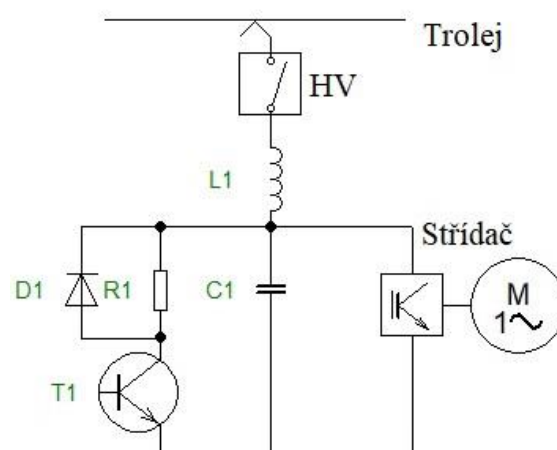
V traktu se používají třífázové asynchronní trakční motory s kotvou nakrátko, které jsou převážně dnes napájeny z napět'ových třífázových měničů s proměnným kmitočtem. Dříve byly využívány i proudové měniče s mezifázovou komutací, které využívaly obyčejné tyristory. Nicméně důvodem použití dnešních napět'ových střídačů je možnost rozsahu velkých výkonů, které jsou pro traktu s požadavky na stále zvyšující výkon výhradou [23].



Obr. 12: Schéma - 1f napět'ový střídač [18]

Obvodové schéma výše popisuje základní variantu čtyř kvadrantového měniče zvaného také jako H můstek. Skládá se ze čtyř spínaných libovolných prvků, které byly popsány výše a čtyř antiparalelně zapojených diod, které mají funkci nulových diod. Sepnuty jsou vždy spínače v diagonále – T1+T4, resp. T3+T2.

Moderní trakční vozidla na stejnosměrné síti s asynchronními motory řízené napěťovými střídači umožňují rekuperační elektrodynamické brzdění přes stejnosměrný meziobvod tvořený filtračním kondenzátorem. Principiální schéma zapojení řízeného pohonu na DC troleji popisuje Obr. 13. Kondenzátor má za úkol vytvářet pro střídač napěťový zdroj, který je nezbytný pro správnou funkci střídače. Stejnosměrný meziobvod je napájen přes sběrač, hlavní vypínač a tlumivku z trolejového vedení. Tlumivka zde zabraňuje šíření rušivých vlivů vznikajících funkcí střídače do trakční sítě. Ve stejnosměrném obvodu je dále zapojen brzdňý odporník, který připíná brzdňý odpor k meziobvodu v případě, že trolej nepřijímá rekuperovanou energii. To se děje v okamžiku, kdy v blízkosti rekuperujícího vozidla není žádné jiné vozidlo, které by přijímalo energii, nebo je zde jen nízký odběr. Proud ze střídače dále zvyšuje napětí v meziobvodu do chvíle, než dosáhne hraniční hodnoty nastavené pro sepnutí brzdňého měniče. Pokud je ale v blízkosti dostatečný odběr, veškerý proud teče zpět do trolejového vedení. Hodnota pro sepnutí brzdňého odporu musí být vyšší než maximální hodnota napětí TNS, aby spínač odporníku nespínal v běžných provozních hodnotách např. v blízkosti TNS. Účelem odporníku je vybití kondenzátoru a děj se cyklicky opakuje, pokud nelze rekuperovat energii do sítě. Rekuperace je umožněna změnou řízení střídače tak, že střídač generuje napětí o nižší frekvenci, než je synchronní frekvence motoru při daných otáčkách. Tím přechází motor do stavu asynchronního generátoru a tok energie je opačný z motoru přes střídač do meziobvodu. Střídač do meziobvodu dodává stejnosměrný proud, který nabíjí kondenzátor (zvyšuje napětí) [24].



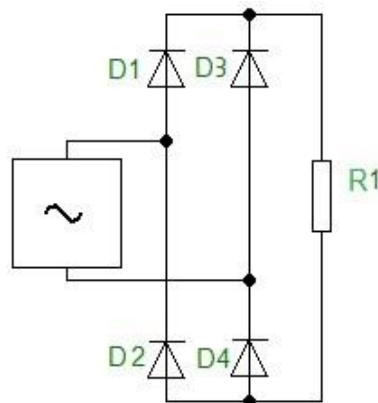
Obr. 13: Schéma vozidla s asynchronním motorem na DC 3kV [18]

2.1.3 Vozidlo na soustavě AC 25 kV s asynchronním pohonem

Vozidla na střídavé síti s asynchronním pohonem mají část topologie totožnou, jako zmiňovaná vozidla v kapitole 2.1.2 na stejnosměrné síti. Pro řízení asynchronního pohonu je nezbytný napěťový střídač, o kterém bylo pojednáno výše. Pro vytvoření ideálních podmínek pro střídač je potřeba stejnosměrný meziobvod, stejně jako v předchozí kapitole, tvořený kondenzátorem. Nicméně je nutný další výkonový prvek, který v předchozích kapitolách zmíněn nebyl. Protože stejnosměrný meziobvod navazoval okamžitě na stejnosměrné trakční vedení, nebylo potřeba používat měnič zvaný usměrňovač. Pro vytvoření napěťového meziobvodu na střídavém vedení je nejjednodušším řešením diodový usměrňovač s LC filtrem [24].

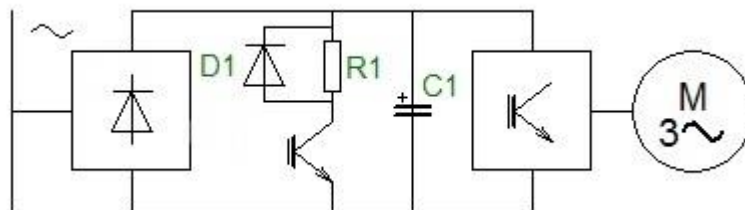
2.1.3.1 Diodový usměrňovač

Diodový usměrňovač Obr. 14 je jeden ze základních výkonových obvodů, který slouží pro změnu střídavého napětí a proudu na stejnosměrné napětí a proud.



Obr. 14: *Neřízený dvou pulzní usměrňovač*

Je několik typů a způsobů zapojení usměrňovačů, ale v trakci, pokud už je tento jednoduchý měnič využit pro pohon asynchronního motoru, můžeme nejčastěji vidět jednofázový dvou pulzní usměrňovač nebo třífázový šesti pulzní usměrňovač. Jednoduchost diodových usměrňovačů tkví v použití pouze výkonových diod, které ovšem ze sítě odebírají nesinusový proud a z hlediska elektromagnetické kompatibility směrem k napájecí troleji je tento stav krajně nežádoucí.

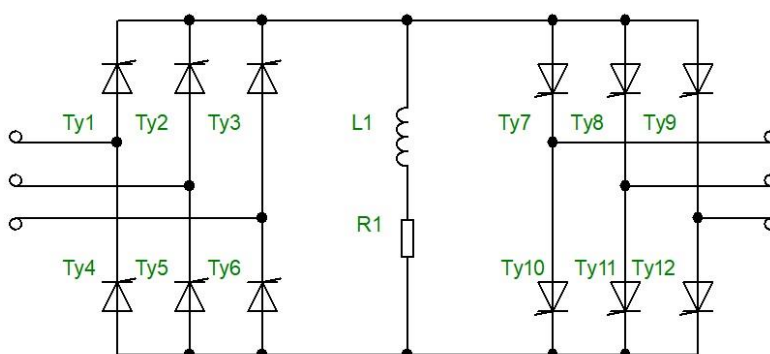


Obr. 15: Výkonový obvod pohonu s asynchronním motorem bez možnosti rekuperace s brzděním do odporníku [18]

Výhoda, ale i nevýhoda může být nemožnost jejich řízení a zejména nemožnost reverzace, kdy vracená energie musí být mařena v odporníku. Proud a napětí může procházet pouze jedním směrem, a proto při použití diodového usměrňovače lze pohon provozovat pouze jako motor. Výhodou oproti dalším zařízením (reverzační usměrňovač), který umožňuje reverzaci, je přijatelnější účinník [18].

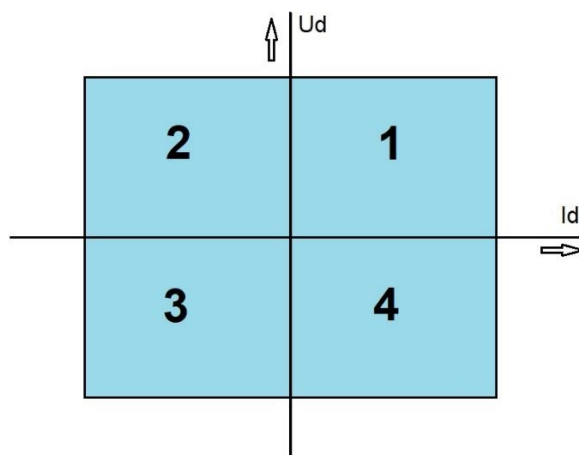
2.1.3.2 Reverzační usměrňovač – Deformace odebíraného výkonu

S použitím tohoto usměrňovače Obr. 16 přišla éra možnosti rekuperace energie z pohonu zpět do trakční sítě. Bylo tak docíleno pomocí dvou antiparalelních zapojení řízených tyristorových usměrňovačů, které umožňovaly vytvářet obě polarity proudu i napětí. Tyto měniče lze využít jak pro pohony stejnosměrné, tak pohony střídavé. V kapitole 2.1.2.1 jsme si uvedli, že i napěťový střídač lze vhodným řízením provozovat v usměrňovačovém chodu a přes stejnosměrný obvod lze tak využít vlastností reverzačního usměrňovače. Způsobů zapojení dvou usměrňovačů je několik, nicméně podstatou funkce je, aby vždy pouze jeden z usměrňovačů pracoval do zátěže a tím byl určen tok proudu. Na Obr. 16 vidíme základní antiparalelní zapojení dvou usměrňovačů [25].



Obr. 16: Reverzační usměrňovač – antiparalelní zapojení dvou 3f můsteků [18]

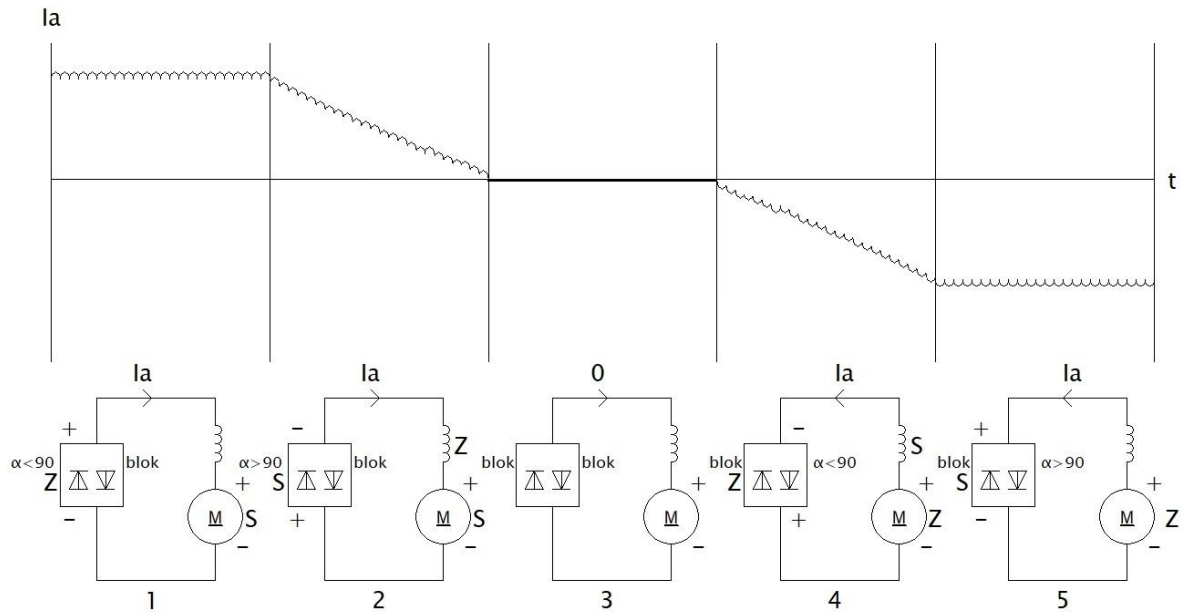
Napříč všem ostatním předchozím usměrňovačům, které se vyznačovaly tzv. dvou kvadrantovým chodem bylo možno tento usměrňovač provozovat jako tzv. čtyř kvadrantový Obr. 17.



Obr. 17: Provozní oblasti čtyř kvadrantového usměrňovače [25]

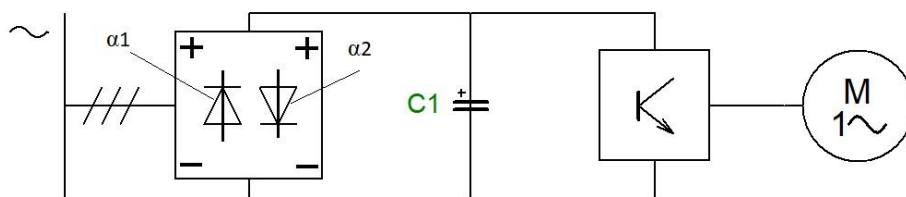
- Kvadrant 1: Pohon odebírá energii ze zdroje a je v motorickém režimu. V činnosti je 1. měnič, který pracuje v usměrňovačovém chodu.
- Kvadrant 2: Napětí zdroje je kladné polarity a je menší než napětí pohonu. Proud pohonu je záporný. V činnosti je druhý měnič pracující ve střídačovém chodu. Pohon je v generátorickém režimu a energie je dodávána zpět do sítě.
- Kvadrant 3: Napětí zdroje je větší než napětí pohonu. Napětí i proud zdroje má zápornou polaritu. V chodu je druhý měnič v usměrňovačovém chodu a pohon je v motorickém režimu.
- Kvadrant 4: Napětí zdroje je záporné polarity a menší než napětí pohonu. Proud pohonu je kladný. V činnosti je první měnič pracující ve střídačovém chodu. Pohon je v generátorickém režimu a energie je dodávána zpět do sítě.

Změna polarity napětí a toku proudu skrze jednotlivé usměrňovače je uzpůsobena řízením tyristorových prvků měniče. Řízením úhlu α , úhel otevření tyristoru, lze tyristory řídit ze stavu otevřený do stavu blokujícího. Pro lepší pochopení funkce reverzačního usměrňovače slouží Obr. 18, kde je vidět změna řídicího úhlu obou usměrňovačů, a tak možnost rekuperace, kdy je do sítě dodáván proud z pohonu. Stejnoseměrný motor supluje stejnosměrný meziobvod asynchronního pohonu na střídavé síti [18].



Obr. 18: Přejímový jev pohon – brzdění s reverzačním usměřovačem [18]

Při kladných otáčkách motoru pracuje první měnič jako usměřovač a napájí stejnosměrný motor. Zároveň zde musí platit, že na druhém měniči musí být napětí takové, aby neprocházet proud, který by se mohl uzavírat mezi oběma usměřovači. Proud, který by mohl být uzavřen se nazývá okruhový. V motorickém chodu pracuje usměřovač I s řídicím úhlem α_A , a usměřovač II s řídicím úhlem $\alpha_B = 180^\circ - \alpha_A + \Delta\alpha_A$. Absolutní hodnota napětí $U_B > U_A$. Přejímový režim pohonu v generátorický poté probíhá tak, že se začne zvětšovat úhel α_A (snižujeme U_A) a zároveň snižujeme α_B . V momentě, kdy $U_A = U_M$ zmizí proud. Jestliže napětí U_B je větší než U_M , můžeme vhodným zvyšováním úhlu α_A , a též zmenšováním úhlu α_B , zajistit přechod usměřovač II do střídačového chodu [18].



Obr. 19: Blokové schéma rekuperačního pohonu s reverzačním usměřovačem bez brzděného odporu [18]

Ačkoliv je reverzační usměřovač schopen vrácení energie zpět do sítě a pracovat ve střídačovém chodu, jsou zde značné nedostatky, kvůli kterým není vhodné tento měnič využívat pro rekuperaci. Mezi problematické vlastnosti patří zejména obtížná kompenzace

účinníku $\cos \varphi$, který je v pracovních cyklech rychle se měnící v závislosti na proměnném řídicím úhlu α . Vzájemný časový posun mezi amplitudou sinusového průběhu napětí o efektivní hodnotě U_1 a frekvenci f_1 a amplitudou sinusového průběhu proudu o efektivní hodnotě I_1 a frekvenci f_1 značíme φ a kosinus φ nazýváme účinníkem. Toto je účinník $\cos \varphi$. Celkový účinník usměrňovače není ovlivněn pouze vzájemným časovým posunem amplitud proudu a napětí, ale také celkovým harmonickým zkreslením proudu. Jelikož usměrňovač je nelineární zařízení odebírající neharmonický proud, odebírá mimo 1. harmonické složky i vyšší harmonické. Vzniká tak harmonické zkreslení, které se promítá na celkovém účinníku usměrňovače. Podíl vyšších harmonických účinník usměrňovače dále snižuje.

Celkový účinník usměrňovače [23]:

$$\Lambda = \frac{U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + THD^2}} \cos \varphi \quad (2.1)$$

Kde účinník zde je vyjádřen jako výkon jen z 1. harmonické [27]:

$$P_{av} = \frac{U_m \cdot I_{m1}}{2} \cos \varphi_1 = U \cdot I_1 \cos \varphi_1 \quad (2.2)$$

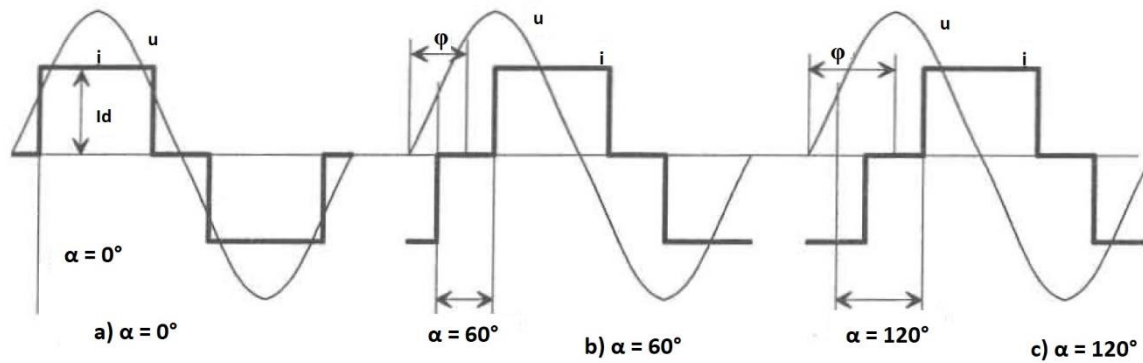
A součinu dvou efektivních hodnot napětí a proudu, zjednodušeně též také zdánlivého výkonu:

$$S = U \cdot I \quad (2.3)$$

A jaký vliv na výsledný účinník mají vyšší harmonické a kde se promítnou? I_1/I je celkové harmonické zkreslení THD podle definice, které můžeme vidět ve vzorci (2.1) [27]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_n^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \sqrt{\frac{I^2 - I_1^2}{I_1^2}} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} > \frac{I_1}{I} = \sqrt{\frac{1}{1 + THD^2}} \quad (2.4)$$

Dalším neduhem reverzačního usměrňovače je odběr značně nesinusového síťového proudu, který je spojený s velkým odběrem jalového výkonu na první harmonické. Odběr nesinusového proudu způsobuje ztráty ve vedení a zejména deformuje napětí sítě. Na Obr. 20 můžeme vidět nakreslené průběhy fázového napájecího napětí U_1 a fázového proudu I_1 třífázového usměrňovače bez komutace. Jsou zde znázorněny výše zmíněné fakty, jako odebíraný nesinusový proud a změna účinníku $\cos \varphi$ vlivem změny řídicího úhlu α . Nesinusový odběr síťového proudu je zapříčiněn spínáním polovodičových tyristorových prvků reverzačního usměrňovače [26].

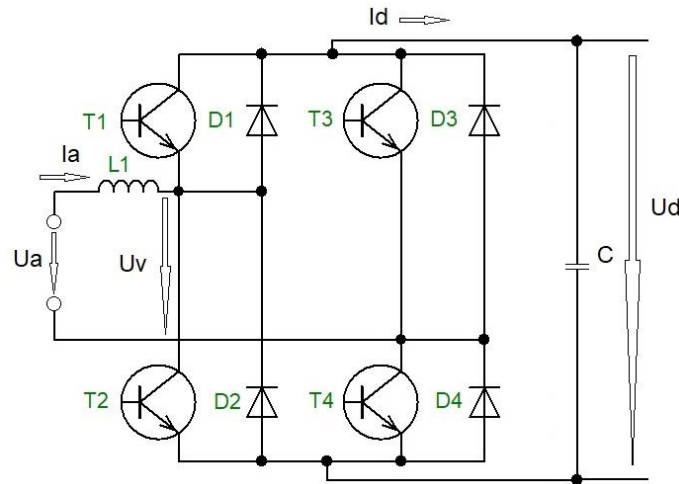


Obr. 20: Časové průběhy napětí a proudu pro různé řídicí úhly usměrňovače [26]

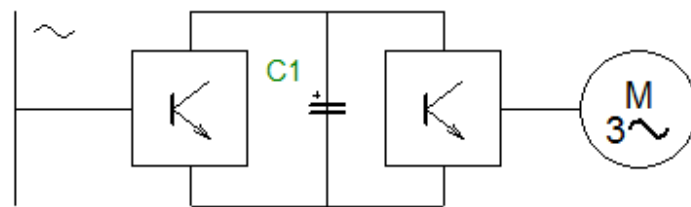
2.1.3.3 Pulsní usměrňovač – Kompenzace účinníku a harmonických proudů

V dnešní době, kdy jsou detailně známé nedostatky a vlivy měničů, zejména reverzačních usměrňovačů na danou síť, jsou moderní trakční vozidla vybavena tzv. pulzními usměrňovači. Většina dnes používaných trakčních lokomotiv jsou víceúčelového charakteru, který se vyznačuje možností jízdy po systému nejen 25 kV stř., ale i 15 kV 16,7 Hz a stejnosměrném systému 1,5 kV a 3 kV. Všechna tato vozidla, pokud jsou navržena pro rekuperaci, kde je záměrem energii do sítě i vracet, obsahují pulzní usměrňovač [23] [27].

Pulzní usměrňovač Obr. 21 je dnes nejúčinnějším řešením, které je využíváno v měničích pro trakční vozidla. Pulzní usměrňovač stejně jako neřízený diodový usměrňovač, nebo reverzační usměrňovač je prvkem pro napájení stejnosměrného meziobvodu s tou výhodou, že dokonale stabilizuje napětí a vedle toho minimalizuje nedostatky reverzačního usměrňovače. Ze sítě odebírá přibližně sinusový proud s účinníkem téměř 1 a nedochází tak k fázovému posuvu mezi napětím a proudem. Tímto usměrňovačem lze napájet stejnosměrný meziobvod střídavého pohonu se střídačem, tak i stejnosměrný pohon s pulzním měničem DC/DC [27].



Obr. 21: Detail pulsního měniče

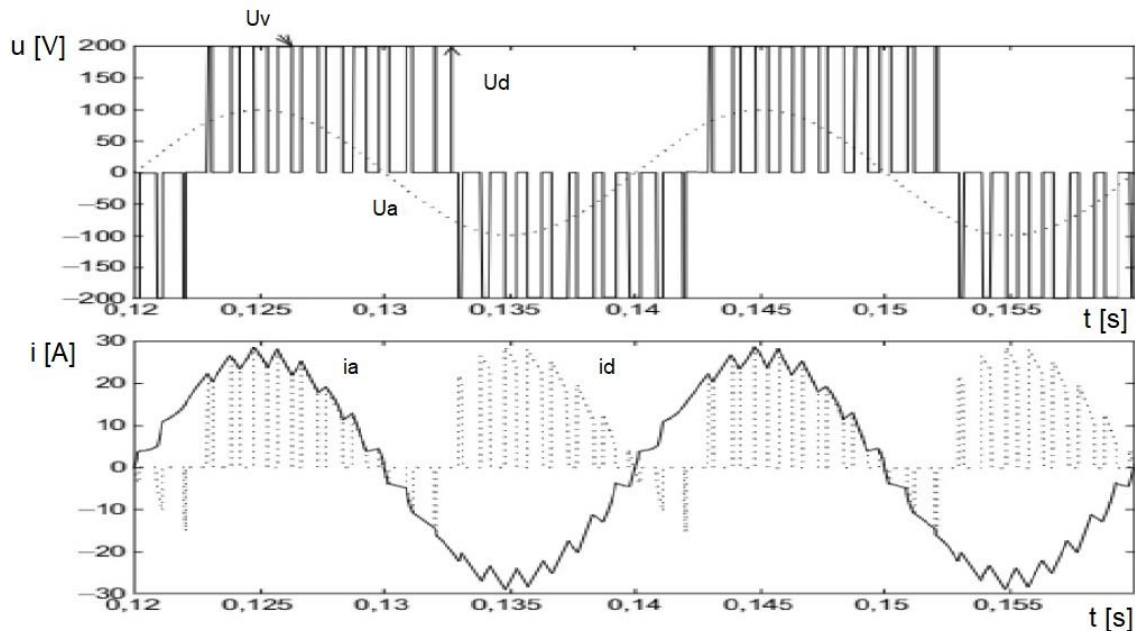


Obr. 22: Blokové schéma střídavého pohonu na střídavé síti s možností rekuperace pomocí pulsního usměrňovače [18]

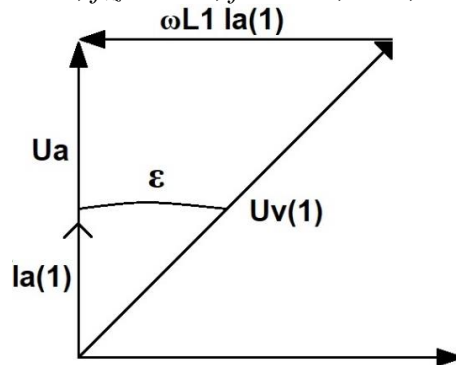
Pulzní usměrňovač Obr. 22 využívá ke své činnosti plně celořizené prvky (s řízeným vypnutím (GTO, IGBT, IGCT)). Nepoužívá diody a tyristory. Díky těmto součástkám s vhodným řízením, usměrňovač zajišťuje zlepšené parametry elektromagnetické kompatibility směrem k napájecí troleji – větší účinník (Power Factor λ), menší obsah vyšších harmonických v napájecím proudu. Především je schopný přenášet energii oběma směry a vykonávat tak „bezeztrátové“ rekuperační brzdění. Dle Obr. 21 můžeme vidět, že schéma je topologicky shodné s jednofázovým střídačem.

Je několik možností, jak řídit topologicky shodné jednofázové střídače, přičemž nejužívanějším způsobem řízení je šířkově pulzní modulace též známá jako PWM. Právě pomocí řízení můžeme jednofázový střídač provozovat v usměrňovačovém chodu nebo naopak pulzní usměrňovač jako střídač. Změnu stejnosměrného napětí na střídavé napětí provádíme střídavým vypínáním a zapínáním napětí zdroje pomocí měniče na zátěž vícekrát za dobu výstupní periody napětí. Tvar výstupního napětí tak bude velice blízký sinusovému průběhu. Za účelem provést opak, vytvořit stejnosměrný průběh ze střídavého, je nutné změnit řízení spočívající ve zkrácení doby vedení spínačů oproti vedení zpětných diod. Pokud nedojde ke změně polarit napětí na stejnosměrné straně, změní se smysl střední

hodnoty proudu a tím i smysl přenášeného výkonu. Při použití zmíněných součástek je komutace vlastní a nejsou zde potřeba další komutační obvody, které jsou jinak potřeba pro vypínání proudu v obvodech s tyristory.



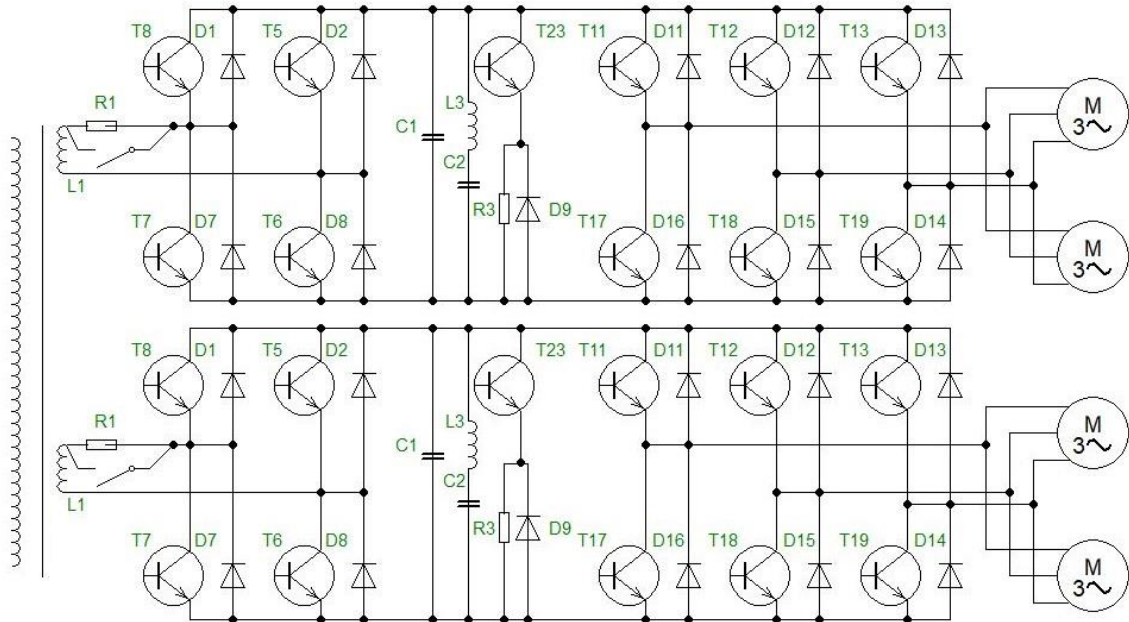
Obr. 23: Napětí a proud pulzního usměrňovače. Parametry usměrňovače: $U_m=100$ V, $U_d=200$ V, $f_{vz}=1$ kHz, $f=50$ Hz, $L=0,01$ H [27]



Obr. 24: Fázorový diagram

Vlivem digitálního řízení pomocí PWM založené na koincidenci pilového napětí se sinusovým signálem dochází k vyšší účinnosti výkonového měniče. Na Obr. 21 můžeme vidět před měničem zařazenou cívku. Tato cívka zde slouží pro odběr proudu první harmonické s velmi dobrým účínkem. Princip je takový, že je potřeba zajistit, aby napájecí napětí můstku U_v bylo zpožděno za odebíraným proudem I_a o úhel ε . Z fázorového diagramu Obr. 24 také dále plyne, že maximální hodnota napětí v meziobvodu bude větší než amplituda napájecího napětí. Z teze výše je řečeno, že pulzní usměrňovač je řízen úhlem ε a také poměrným sepnutím tzv. modulačním poměrem M . Pokud je $U_d = \text{konst.}$, jsou ε a M propojeny vztahem:

$$\frac{U_a}{\cos \varepsilon} = U = M \cdot U_d \frac{1}{\sqrt{2}} > \varepsilon = \arccos \frac{\sqrt{2} U_a}{M \cdot U_d} \quad (2.5)$$



Obr. 25: Zjednodušené zapojení střídavého vozidla s pulsními usměrňovači [28]

Ačkoliv se může zdát, že funkce pulzních usměrňovačů jsou dokonalé, jde pouze o teorii. Faktem zůstává, že i tento měnič, jako každý jiný, je zdrojem vyšších harmonických a do stejnosměrného obvodu vnáší proudy s širokým spektrem harmonických. Velikost a kmitočty závisí na nosném kmitočtu, způsobu modulace, pracovním režimu střídačů, a i na vlastnostech trakčních motorů [28].

Činnost pulzního usměrňovače vnucuje do meziobvodu proudy s kmitočty sudých harmonických síťového kmitočtu, zejména 2. harmonickou. Bohužel ani ideální modulace nemůže tuto druhou harmonickou odstranit, a tak bývá potlačena kondenzátorem nebo rezonančním filtrem v meziobvodu. Můžeme vidět ve schématu Obr. 25 jako prvky C1, L3 a C2. Složku proudu je vhodné kompenzovat za účelem minimalizace ztrát, deformace napětí, ale i vzniku problematických stavů v trakčním motoru jako jsou například pulzační momenty, které mohou vést až k poškození. Opomenou nelze ani to, že z druhé strany má vliv na stejnosměrný obvod také střídač, který při rekuperaci do DC obvodu bude vnucovat vyšší harmonické. Pro eliminaci vyšších harmonických proudů poslouží kondenzátor, kde se proudy uzavírají, ale také tvoří na kondenzátoru zvlnění. Pokud je zvlnění příliš velké,

paralelním připojením LC filtru naladěným na danou harmonickou ke kondenzátoru lze proudy kompenzovat. Reaktance filtru je pro kompenzovanou harmonickou nulová, tím je deformační složka napětí filtrem zkratována [28].

3 Technické problémy na straně pevných trakčních zařízení a distribuční sítě

Tato kapitola je zaměřena na nejčastěji vyzdvihovaná úskalí střídavého systému 25 kV v České republice, která se vážou nejen k problému z pohledu rekuperace, ale i problematiky tzv. hladkého provozu. Aktuální nedostatky a jejich možná řešení, která vedou k možnosti rekuperace energie zpět do distribuční sítě takovým způsobem, který je reálný jak pro provozovatele KD, tak i distributora energie spolu úzce souvisí. Proto rozdělení kapitol problematiky pevných trakčních zařízení a problematiky ze strany distributora by bylo spíše matoucí než přínosné. Zaměříme se na tyto aspekty:

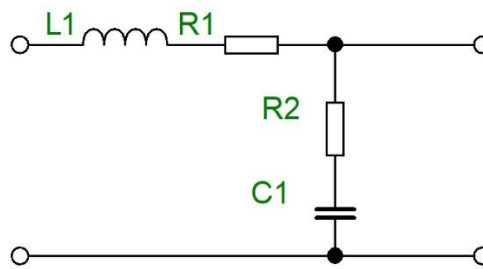
- impedance vedení,
- nesymetrické zatížení třífázové distribuční sítě,
- nutnost odpojování sběračů,
- oboustranné napájení úseků.

V první kapitole byly stručně popsány užívané systémy, se kterými se lze v České republice setkat. Tato kapitola posloužila jako dokonalý podklad pro nastínění, protože nejlepším vyjádřením je porovnání mezi danými systémy.

3.1 Impedance vedení

Impedance je všeobecně fyzikální veličina vyskytující se v obvodech napájených střídavým harmonickým zdrojem napětí a proudu. Je vyjádřena komplexním číslem, které obsahuje reálnou a imaginární složku popisující zdánlivý odpor a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu o dané frekvenci. Stejně jako u stejnosměrného systému jsou ztráty na vedení dány odporem vodičů, tak každý elektrický vodič napájený harmonickým zdrojem obsahuje elektrický odpor, indukčnost, kapacitu a svodovou vodivost. Všechny tyto veličiny jsou obsahem impedance. Pro nás zajímavý výraz spíše impedance vedení.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3.1)$$

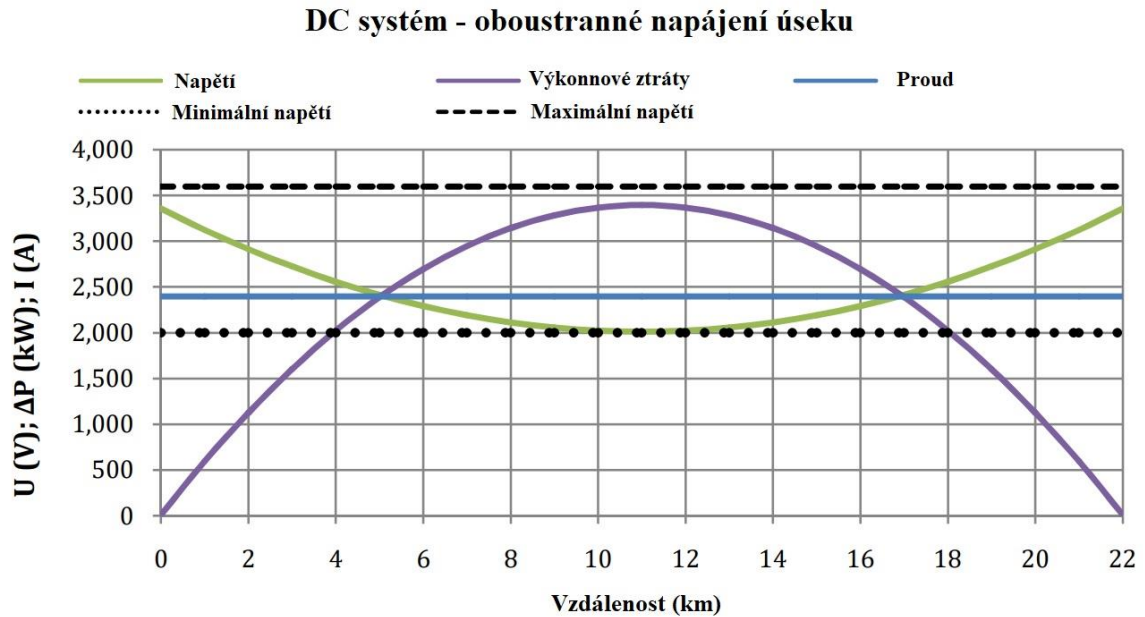


Obr. 26: Náhradní schéma vedení s podélnou impedancí a příčnou admitancí

Obr. 26 je schéma charakterizující jakékoliv přenosové vedení, ať už se jedná o vedení v trakci nebo vedení energetické sítě a charakterizuje reálné hodnoty vedení, jež jsou frekvenčně závislé. Dle vzorce výše můžeme vidět, že impedance stejného vedení o stejných parametrech R , L , C , G bude zejména závislá na frekvenci, protože $\omega = 2\pi f$ a to způsobem, že se zvyšující se frekvencí bude impedance vzrůstat. Můžeme říci, že čím menší frekvence je, tím příznivější parametry vedení má a impedance vedení je nižší. Za těchto předpokladů můžeme jednoduše porovnat, že vedení využívající systém 15 kV 16,7 Hz bude mít příznivější vlastnosti oproti systému 25 kV 50 Hz. Důležitějším porovnáním vlastností vedení je u systému střídavého 25 kV se systémem stejnosměrným 3 kV. Značný rozdíl je v použitém množství materiálu pro stavbu vedení. Impedance střídavého vedení o frekvenci 50 Hz s kombinací navýšeného napětí zaručuje zvýšené přenosové schopnosti. Navíc i menší ztráty vlivem nižších proudových toků vedou k nižšímu počtu napájecích stanic. Veškeré parametry vodičů trakčního vedení jak pro DC systém, tak AC systém jsou uvedeny v normě ČSN 34 1530 a ČSN EN 50149 ED.2. Zatímco DC systém musel být napájený trakčními měnírnami přibližně každých 10 km, AC systém lze napájet trakční napájecí stanicí po 50 km.

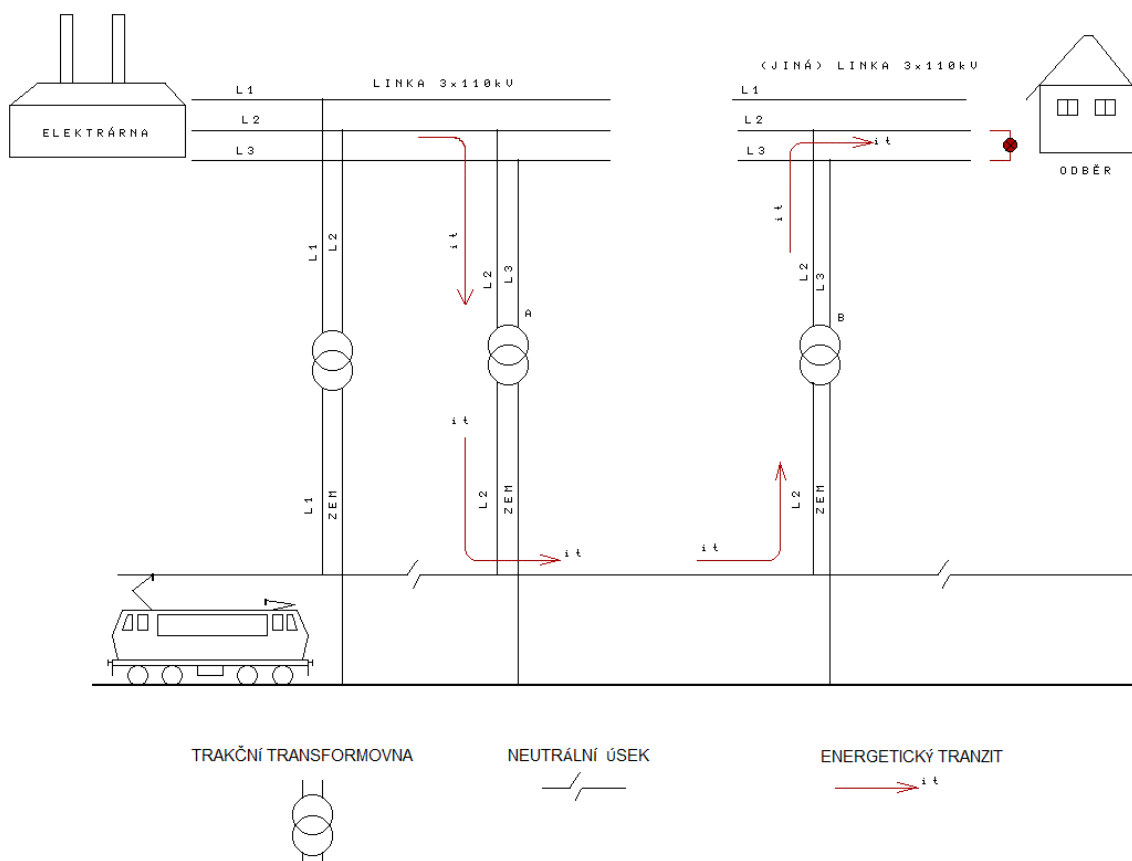
3.2 Jednostranné / oboustranné napájení úseků

Již v úvodu zazněla fakta DC a AC systému, a i přes nepříznivá hlediska DS sítě jako je impedance vedení (značný úbytek napětí), omezení výkonosti tratí, značné náklady na použitý materiál, má DC systém výhodu v oboustranném napájení úseku. To zaručuje delší úsek bez přerušení vlivem menšího poklesu napětí na kilometr trati [29].



Obr. 27: DC oboustranné napájení s konstantním proudem, převzato z [30]

AC systém v tomto případě nelze napájet oboustranně. Ačkoliv zde původně byly snahy a uvažovalo se o oboustranném napájení úseků. Vznikaly zde značné problémy s přetokem tranzientních proudů Obr. 28. Proud z vedení VVN, který napájí NS využívalo trakční síť jako cestu nejmenšího odporu a TV sloužilo jako rozvod elektrické distribuce, jelikož transformátory v NS jsou schopny přenášet výkon i v opačném směru. V případě zkratu na distribuční síti tak mohlo dojít k napájení postiženého místa trakčním vedením, které tvoří paralelní cestu proudu [29].



Obr. 28: Přetok tranzientních proudů, převzato z [29]

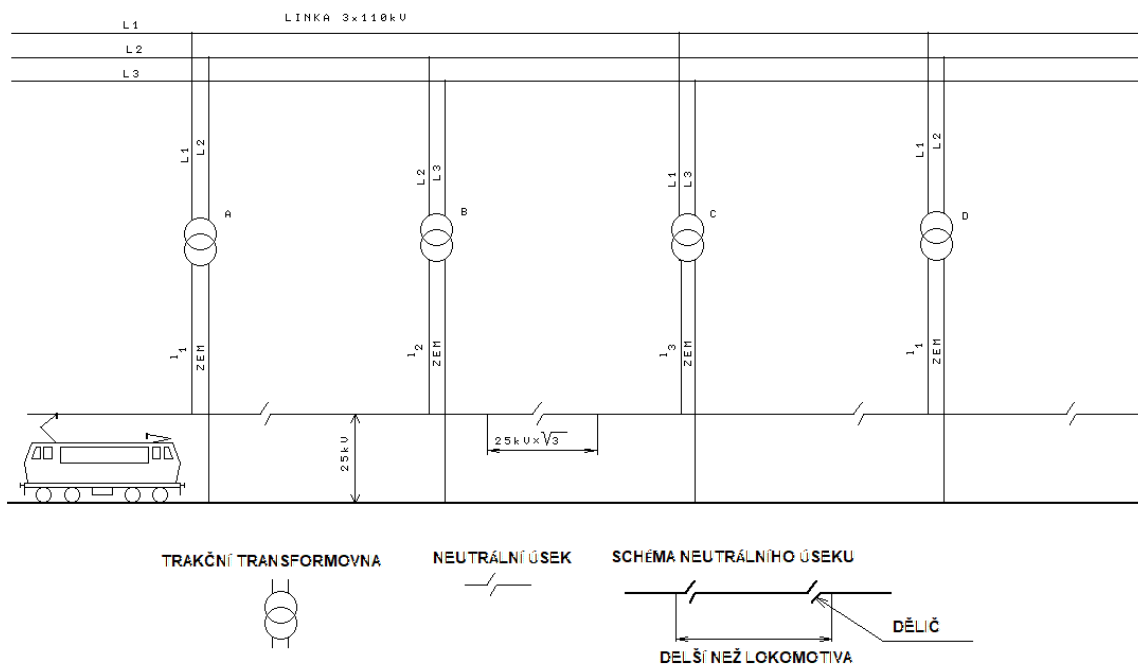
Řešením tohoto problému by mohl být samozřejmě systém, který by zabráňoval průtoku tranzientních proudů a při opačném směru výkonu by trakční měnič odpojil a vůbec tak neumožnil stav nežádoucí. Tento problém řešila tzv. Wattova relé, která byla schopna rozeznat směr výkonu a při naměřené záporné činné složce okamžitě odpojily NS. Nicméně tento systém absolutně znemožňuje využití rekuperace, kde je účelem vrátet energii z TV do DS, a tak měnit směr toku výkonu. Závěrem je jasné, že pokud chceme rekuperovat energii, nesmějí být použita Wattova relé a úseky tak nesmí být napájeny oboustranně [29].

3.3 Nesymetrické zatížení třífázové distribuční sítě

Na Obr. 28 vidíme částečně topologii zapojení TV. DS je vedena jako třífázový systém, nicméně trakční vedení je používáno jako jednofázový systém. Zde nastává obtíž, jak úspěšně využít veškeré tři fáze, nepřetěžovat jednu z fází a jak rekuperovat do všech tří fází rovnoměrně. Všechny tyto aspekty je důležité mít na paměti. Protože poskytovatel el. energie, která je vedena z DS přes NS do TV o hladině 25 kV má jasná stanoviska pro jednofázový odběr. Nelze tak jednoduše veškeré TV napájet z jedné fáze [29]. Pro zatížení

nebo jednofázový odběr je ukazatelem zejména zkratový výkon DS. Dříve mohl být maximální odebíraný výkon z jedné fáze 2 % zkratového výkonu DS. Dnes je tato hodnota ponížena na 0,7 % z důvodu stability sítě, symetričnosti fází a kvalitnější dodávky energie, kterou distributor zaručuje. Tato nesymetrie měla neblahý vliv na transformátory. Abychom to upřesnily, většina NS disponuje výkonem okolo 10-20 MVA, tudíž NS pro systém TV 25 kV lze připojovat jen v místech, kde zkratový výkon sítě je větší než 1 400-2 800 MVA. Připojení TNS na VN o hodnotě 22 kV je nereálné, protože zde zkratový výkon dosahuje hodnot okolo 100–200 MVA a neposkytuje dostatečně tvrdý zdroj NS. Vhodným užitím je až systém DS o hodnotě 110 kV, kde však zkratový výkon musí dosahovat hodnot mezi 1 400-3 000 MVA, což bývá blízko transformoven 400 / 110 kV [29].

Pro nepřetěžování jedné fáze a minimalizovat tak nesymetrický odběr energie se přistoupilo k tzv. střídání fází. Napájení TV je poskytováno jednofázovým transformátorem v NS, kde primární vinutí je zapojeno mezi 2 fáze 110 kV a sekundární vedení je zapojeno mezi trakční vedení a kolejnici. Prostředím fází můžeme vidět na Obr. 29 [29].



Obr. 29: principiální schéma napájení trati – AC systém, převzato z [29]

3.3.1 Neutrální úsek

Prostředím fází na jednotlivých úsecích zaručí odběr ze všech tří fází DS a nedojde tak k jednoznačné nesymetrii, ale úseky, jejichž délka se odvíjí od minimální dovolené hladiny napětí musí být odděleny. Úseky nesmí být spojeny, protože vedlejší úsek je vždy

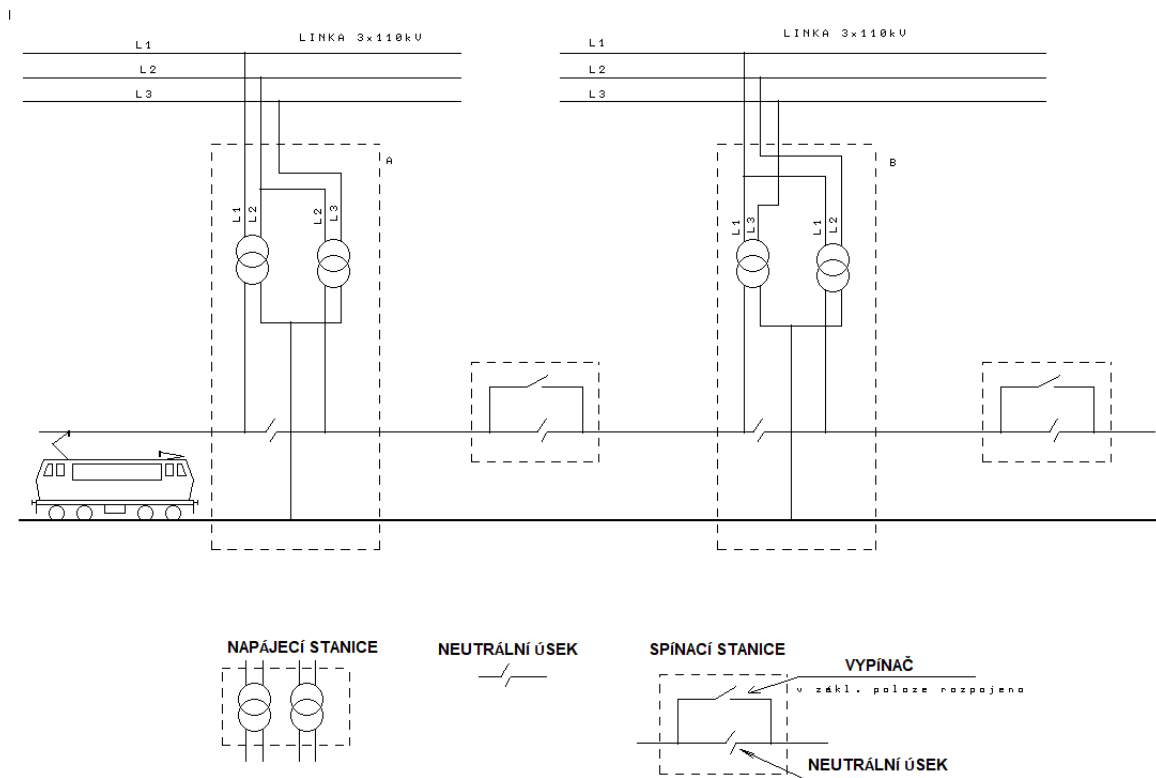
napájen z jiné fáze DS a při jejich spojení by tak došlo k mezifázovému zkratu. Ke zkratu proto, že fáze mezi sebou jsou vzájemně posunuty o 120° a došlo by tak k rozdílu napětí vůči sobě. Tato hodnota by byla rovna sdruženému napětí. Pro oddělení jednotlivých úseků jsou vložena do TV neutrální úseky, která splní podmínku oddělení a slouží tak jako izolační bariéra. Délka neutrálního úseku musí být delší než lokomotiva, aby nedošlo k vytažení napěťového oblouku z jednoho úseku do druhého pomocí sběrače lokomotivy. Průjezd lokomotivy neutrálním úsekem musí proběhnout se staženým sběračem a lokomotiva nesmí odebírat proud při průjezdu neutrálním úsekem. Umístění neutrálních úseků nemůže být nahodilé, protože dochází k přerušení tažné síly, a i napájení pomocných obvodů, nemožnost rekuperovat a vzniká rozkolísanost odběru energie z DS [31].

3.3.2 Napájení TV do „V“

Obr. 29 reprezentuje zapojení tzv. do T, které ale není běžně užíváno. Důvodem je dimenzování transformátoru v NS na plný výkon, což není žádoucí v případě poruchy, kdy by v NS musel být další transformátor. Ten by zde byl pouze jako rezervní a v mezičase bezporuchového stavu by byl nevyužit. Nicméně tento způsob zapojení má i své využití v málo zatížených úsecích, nebo spíše v úsecích koncových [13] [29].

Pro napájení úseků se ale běžně v praxi využívají zapojení typu V. Tento typ zapojení Obr. 30 v podstatě spojuje dvě NS a vytvoří tak jednu NS se dvěma transformátory. Transformátory jsou pro střídání zapojené k třífázové síti za účelem menšího vlivu nesymetrie odběru. Stále je však napětí jednotlivých transformátorů posunuté o 120° a musí tak být u NS neutrální úsek pro oddělení napájených úseků. Hlavní výhodou zapojení do V a pro střídání transformátorů je ale v jejich dimenzování. Transformátory jsou dimenzovány pouze na poloviční výkon NS a při případném výpadku NS mohou transformátory z okolních NS napájet úseky dané NS mimo provoz. Úseky propojující jednotlivé NS jsou rozděleny spínací stanicí s neutrálním úsekem. Ve spínací stanici se nachází vypínač³, který je v základní poloze rozepnut, protože napětí z úseků rozdělených neutrálním úsekem jsou posunuty o 120° . Vypínač slouží ke spojení úseků v případě poruchy jedné s NS [13] [29].

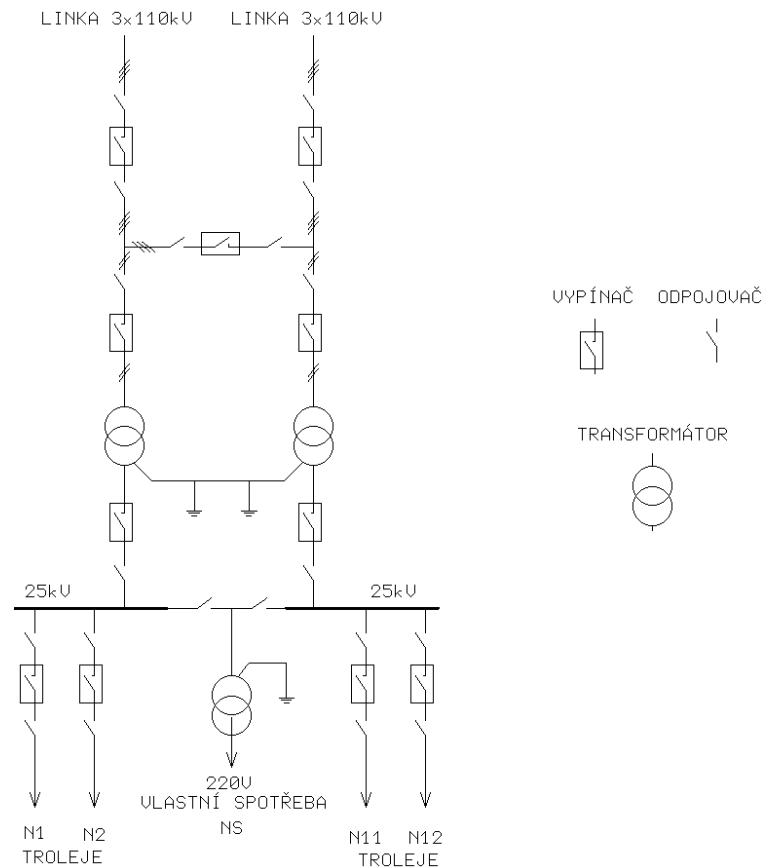
³ Vypínač, výkonový vypínač – spínací zařízení umožňující vypínání provozních i zkratových proudů.



Obr. 30: Napájení TV – schéma typu V, převzato z [29]

3.3.3 Trakční napájecí stanice – TNS (NS)

Trakční napájecí stanice, trakční transformovna, napájecí stanice, toto jsou pojmy, pod kterými se skrývá systém, který slouží k úpravě elektrické energie z distribuční sítě na elektrickou energii o vhodných parametrech pro napájení elektrických lokomotiv na střídavé síti. Vstupem NS je DS VVN o hodnotě 110 kV a výstupem je napájecí napětí, které je přiváděno na trolejové vedení. V NS je umístěn uzemňovací bod pro přívod zpětného proudu, který je nedílnou součástí pro vedení zpětného nebo poruchového proudu z vedení zpět do napájecí stanice. Elektrický odpor zpětné cesty musí být co nejmenší. Jádrem NS jsou z většiny případů dva transformátory v zapojení typu H [29] [31].



Obr. 31: Schéma zapojení napájecí stanice, převzato z [29]

Pro větší spolehlivost je dle možností NS připojena ke dvěma linkám DS. Jde o tzv. dvojitý potah linky, zasmyčkování linky⁴. Konkrétní zapojení na Obr. 30 pojednává o napájení dvojkolejně trati, kde každá z dvojic dvoj kolejí je napájena ze sběrnice jednoho či druhého transformátoru. Sběrnice jsou od sebe odděleny neutrálním úsekem, jak již bylo zmíněno dříve. V případě poruchy jednoho transformátoru je možné pomocí odpojovače⁵ propojit obě sběrnice a zaručit tak dodávku energie i v poruchovém stavu z jednoho transformátoru. Stejná situace propojení a napájení jedním transformátorem může nastat i v případě, že úseky nejsou plně vytěžovány a jsou tak minimalizovány ztráty provozem druhého transformátoru [29].

⁴ Zasmyčkování linky – způsob připojení na rozvodné zařízení provozovatele DS.

⁵ Odpojovač – zařízení, které viditelně rozpojuje vedení. Rozpojení je možné pouze bez zatížení. Slouží jako optická kontrola, že vedení je opravdu odpojeno od okolí.

3.4 Filtračně kompenzační zařízení – FKZ

V kapitole 2 jsme uvedli druhy pohonů, které se běžně vyskytují a provozují na střídavé síti. Byly zmíněny výhody a nevýhody jednotlivých pohonů, zejména měničů. Byly také popsány jejich řešení, nebo alespoň minimalizace negativního efektu. Nicméně hlavní nedostatky, jako je odběr harmonických proudů a špatný účinník ne zcela odstranit topologií zapojení nebo použitými prvky na vozidle. Vozidla s diodovými usměrňovači budou mít stále negativní vliv na síť i přes to, že jsou zde vozidla s pulsními usměrňovači. Dokud se v provozu budou tato vozidla s diodovými či tyristorovými usměrňovači stále vyskytovat, je potřeba omezovat, kompenzovat vyšší harmonické a účinník.

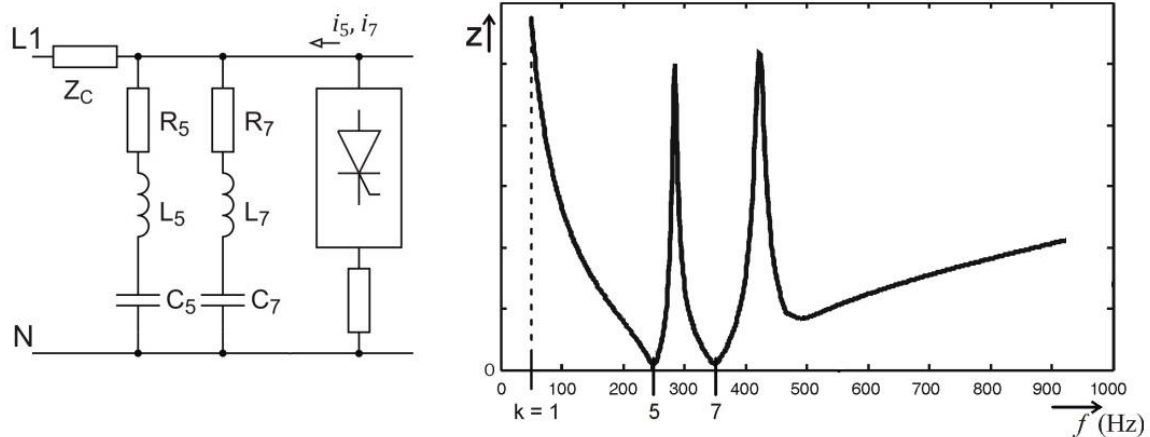
Jediným možným řešením jsou FKZ v trakčních napájecích stanicích. Ano, někdo by mohl namítat, proč nemůže být každé vozidlo vyladěno tak, aby nemělo neblahý vliv na síť. Nedeformovalo napětí, neodebíralo harmonické proudy vyšších řádů, mělo účinník $\cos \varphi$ roven ideálně 1. Problémem je, že realizace FKZ na každé vozidlo nasazené do provozu a vyladěno na nejlepší možné parametry je značně nevhodné. Investice těchto zařízení na lokomotivy se rozhodně nevykompenzují jednotkami procent úspory.

3.4.1 Kompenzace vyšších harmonických

Vyšší harmonické je potřeba kompenzovat už jen z důvodů vytváření ztrát, která působí na spotřebiče v síti, způsobují úbytek napětí, zahřívání vedení Joulovými ztrátami. Největší vliv mají na zařízení s magnetickými obvody jako jsou transformátory nebo právě motory. Vyšší harmonické vytvářejí ztráty v železe P_{FE} , ztráty hysterezní P_H a ztráty vířivými proudy P_V .

Pro úpravu proudového spektra, které je ovlivněno zejména diodovými měniči starších lokomotiv, které do vedení vnucují vyšší harmonické jsou napájecí stanice vybaveny pasivními filtry se sériovými rezonančními obvody laděnými na danou harmonickou. Jde o LC větve Obr. 32 složené ze vzduchových rezonančních tlumivek doplněné o sériové kondenzátorové skupiny s balančními ochranami a výkonovými vypínači. Tyto větve podstatně omezují průnik 3., 5. a 7. proudové harmonické. Filtry jsou připojovány paralelně k síti. Velikost harmonického proudu dané harmonické pronikající do sítě impedancí jedné sériové větve naladěné na n -tou harmonickou Z_n je možné poměrem k_{fn} s impedancí sítě Z_c [23].

$$k_{fn} = \left| \frac{Z_n}{Z_n + Z_c} \right| \quad (3.2)$$



Obr. 32: Schéma filtru a amplitudová frekvenční charakteristika laděného filtru [23] [26]

Součástí železnice jsou vlakové zabezpečovače s nebo bez kolejových obvodů, které jsou choulostivé právě na vytvořené vyšší harmonické proudy. Tyto vlakové zabezpečovací systémy jsou provozovány na daných frekvencích (AC systém využívá frekvence 75 Hz a 275 Hz a DC systém 50 Hz a 275 Hz) a je důležité tuto skutečnost zohlednit při ladění kompenzačních filtrů vyšších harmonických, aby hodnota LC filtru nebyla naladěna na frekvenci zabezpečovacích kolejových obvodů [23].

3.4.2 Kompenzace účinníku

Vedení je stále také ovlivněno posunem fáze proudu, nejčastěji induktivním charakterem usměrňovačů, motorů nebo tlumivek vůči fázi napětí. Výskyt problému je stejný jako s harmonickými proudy a důvod špatného účinníku v síti byl popsán v 2.1.3.2.

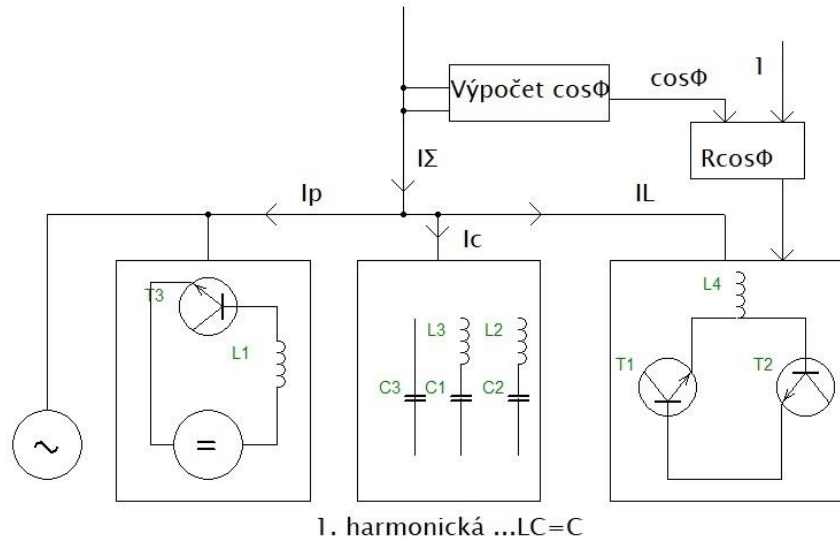
Omezení, kompenzace účinníku probíhá připojením kondenzátoru, který snižuje impedanci pro vysoké frekvence vytvořené právě třeba usměrňovači. Kompenzace tímto způsobem však není schopna eliminovat rychle měnící se účinník vlivem řídicího úhlu usměrňovačů. Další nevýhodou těchto statických kompenzátorů účinníku je jejich zatěžování harmonickými proudy. Pro rychlé změny účinníku se používají polovodičové měniče tzv. fázové regulátory, které dokáží reagovat na rychlé změny. Cílem FKZ je zlepšit účinník alespoň na hodnotu 0,95. Softwarové nastavení fázového regulátoru je zvolena na 0,98, aby reálná hodnota účinníku v připojovacím bodě byla v požadovaných mezích 0,95-1,00. Funkce řízených kompenzátorů je založena na stálém řízení fáze proudu I_L proti proudu I_c .

Úhel natočení těchto dvou proudů je konstantně řízen na π a úhel I_L je řízen úhlem α fázového regulátoru. Pro první harmonickou platí dle prvního Kirchhoffova zákona [23]:

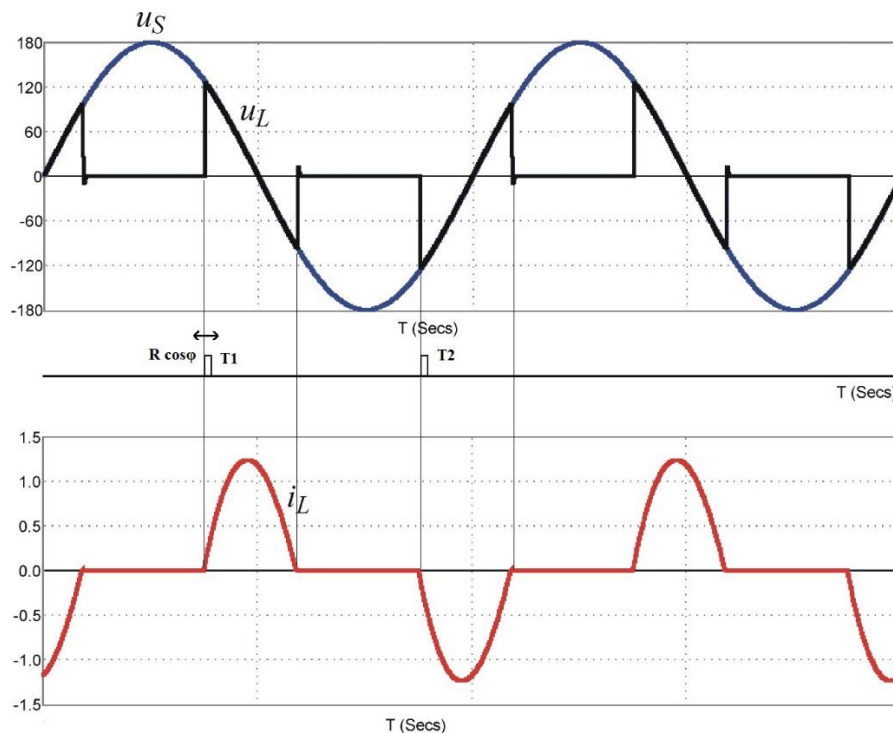
$$\hat{I} = \hat{I}_U + \hat{I}_C + \hat{I}_L \tag{3.3}$$

Během kompenzace první harmonické složky musí být fáze proudu ve fázi s napětím

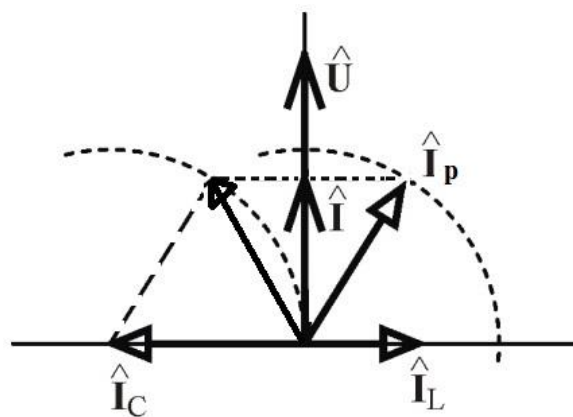
Obr. 35.



Obr. 33: Schéma zapojení kompenzace účinníku s fázovým regulátorem [18]



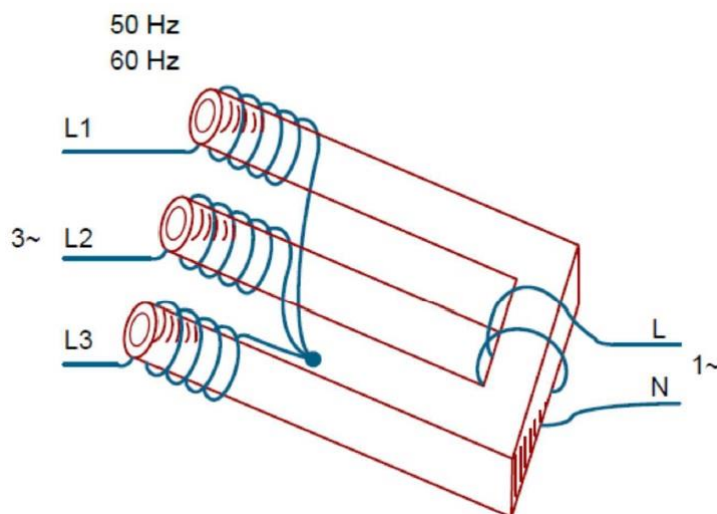
Obr. 34: Fázový posun proudu I_L ku napětí [23]



Obr. 35: Fázorový diagram změny proudu I_L za účelem dosažení $\cos\varphi$ proudu I rovný 1 [18] [23]

3.5 Kompenzační zařízení – „Aktivní balancér“

Možným řešením výše zmíněných problémů by mohlo být použití zařízení nazývané balancér. Aktivní balancér Obr. 36 vyvinutý společností Siemens pod označením Sitrab RAB plus je zařízení určené pro střídavé jednofázové trakční vedení, které je napájeno z třífázové DS. Zjednodušené schéma lze vidět v Obr. 36 níže, které slouží pro představu, jak principiální balancér funguje [32].



Obr. 36: Principiální schéma balancéru, převzato z [31]

3.5.1 Vlastnosti

Popisované vlastnosti, dle zdroje Siemens naznačují, že při použití tohoto zařízení by došlo k eliminaci podstatné části problémů, které jsou na českých železnicích známé. Zejména by byl eliminován nesymetrický odběr výkonu z DS. Aktivní balancér dokáže rovnoměrně odebírat výkon z napájecí třífázové sítě, ale i přijímat výkon z jednofázové

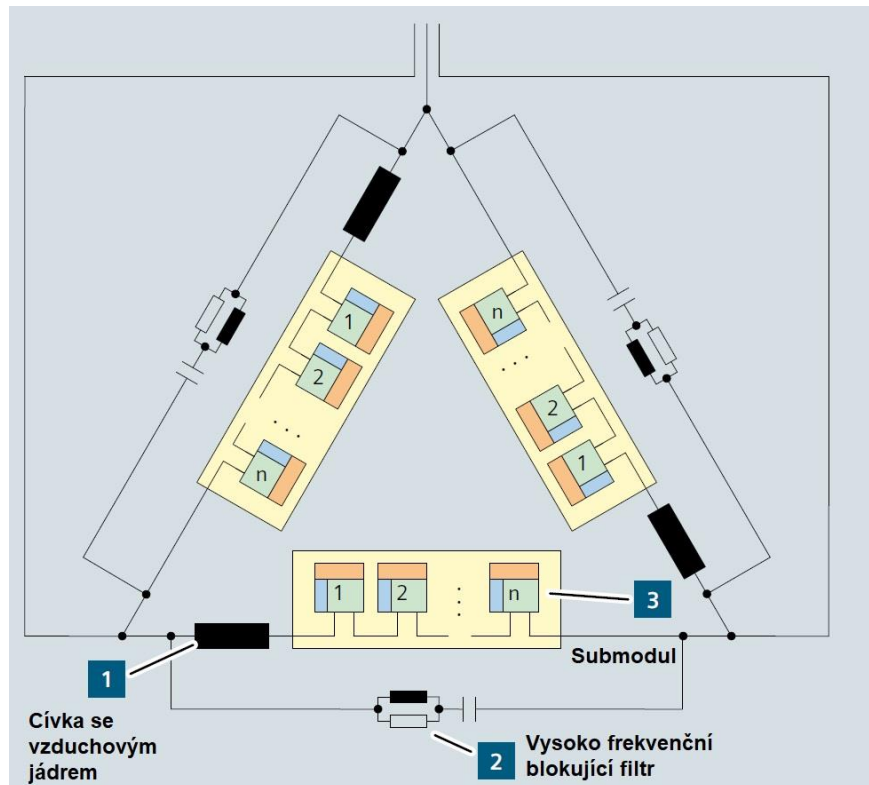
trakční síť a rovnoměrně tak rozložit i rekuperovanou energii. Z pohledu poskytovatele energie z distribuční sítě je tato vlastnost nejvýznamnější pro možnost provozu, ale i rekuperace ČKD směrem do DS [32].

Dle oficiálních informací pro aktivní balancér Sitrab RAB plus je zařízení také schopno kompenzovat účinník. Proto již při návrhu zařízení a umístění do NS není potřeba budovat další kompenzační zařízení. Samotné zařízení však není schopno filtrovat vyšší harmonické, nicméně se zde nabízí možnost instalace přídatných filtrů k zařízení, jako doplněk v případě nezbytnosti. Siemens počítá s tím, že kolejová vozidla, stejně jako automobily v automobilovém průmyslu, procházejí vývojem a již dnes je standart vozidlo s pulsními měniči, které neprodukuje složky vyšších harmonických proudů, které je nutno filtrovat [32].

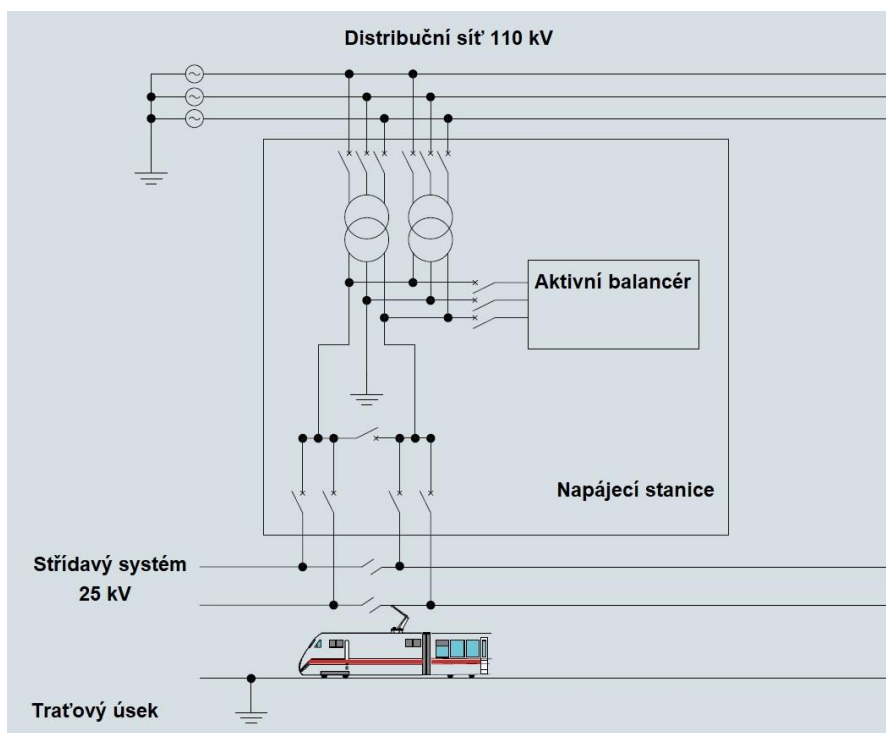
Dále je uvedeno, že zařízení lze projektovat v konfiguracích 25, 35 a 50 MVar a je možné připojit i k napájecí DS o hodnotě 22 kV s dostatečným činným výkonem. To u stávajícího systému s provedením zapojení do „V“ nelze, kvůli nízkým hodnotám zkratového proudu. V porovnání s aktuálně provozovanou konfigurací NS připojovat lze pouze k síti 110 kV, kde je zajištěn dostatečně velký zkratový výkon [32].

3.5.2 Popis a funkce zařízení

Obr. 37 detailněji popisuje schéma zařízení, které je tvořeno třemi větvemi. Zařízení je složeno do tzv. delta spojení, což umožňuje, že každá ze tří větví je samostatně nezávislá na ostatních. Každá větev je tvořena členy (3 – submodules), které jsou popsány jako MMC technologie a skrývají detailnější popis a jsou know how společnosti. Větve mohou být doplněny filtry vyšších harmonických (HFB Filter) [32].



Obr. 37: Schéma aktivního balancéru Sitrab RAB Plus od společnosti Siemens, převzato z [32]



Obr. 38: Schéma zapojení aktivního balancéru k DS v NS, převzato z [32]

Na Obr. 38 je názorné schéma připojení aktivního balancéru do distribuční sítě a trakční napájecí stanice. Nejnovější generace aktivních balancéru Sitrab Rab Plus od Společnosti Siemens je použita v lokacích Austrálie nazývaných „Blackwater“ a „Adelaide“

4 Tolerance napětí a meze hodnot proudu drážních zařízení

Tolerance napětí a výchyly frekvence pro drážní systémy, jako jsou trakční vozidla, pevná trakční zařízení a všechna pomocná trakční zařízení stanovuje norma ČSN EN 50 163 ed. 2. Veškeré tolerance a maximální hodnoty proudů pro jednotlivé systémy drážních zařízení jsou uvedeny v normě ČSN EN 50 388.



4.1 Napětí

Dle Normy ČSN EN 50 163 ed. 2 z roku 2005 platí stanovené hodnoty a limity napětí u střídavých, tak i stejnosměrných soustav TV. Pro střídavé soustavy jsou normou stanoveny také mezní kmitočty, které nesmí být přesaženy. Všechna náležitá napětí jsou zobrazena v Tab. 5, která je přímo převzata z normy ČSN EN 50 163 a též platí pro TSI energie [16] [33].

Během běžných provozních stavů se musí napětí v trakční soustavě pohybovat v rozmezí $U_{\min 1} \leq U_n \leq U_{\max 2}$. Doba, po kterou může napětí oscilovat mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$ je omezena na 5 min. Toto napětí se smí objevit v soustavě pouze při krátkodobých stavech jako je rekuperační brzdění nebo přepnutí systémových odboček pro regulaci napětí [16] [33].

Naopak za výjimečných stavů může být rovněž dosaženo nižšího napětí, než je hodnota $U_{\min 1}$, a to až do úrovně stanového napětí $U_{\min 2}$. Pro tuto výchytku napětí je stanovený mezní čas 2 minuty. V rozmezí $U_{\min 1}$ a $U_{\min 2}$, napětí nesmí způsobit žádné škody a ani poruchy. V napájecích stanicích nebo na palubách drážních vozidel jsou obvykle podpěťová relé, která jsou stanovena na hodnoty od 85 % do 95 % $U_{\min 2}$. Aby bylo zamezeno vzniku nebo výskytu podpětí na síti, bývají trakční vozidla vybavena tzv. omezovači výkonu [16] [33].

Tab. 5: Jmenovitá napětí a jejich přípustné mezní hodnoty a doby trvání, převzato z [33]

Trakční proudová soustava	Jmenovité napětí	Nejnižší krátkodobé napětí	Nejnižší trvalé napětí	Nejvyšší trvalé napětí	Nejvyšší krátkodobé napětí
	U_n [V]	U_{min2} [V]	U_{min1} [V]	U_{max1} [V]	U_{max2} [V]
Doba trvání		Max. 2 min 		Max. 5 min 	
Stejnoseměrná (střední hodnoty)	1500	1000 ($U_n - 33\%$)	1000 ($U_n - 33\%$)	1800 ($U_n + 20\%$)	1950 ($U_n + 30\%$)
	3000	2000 ($U_n - 33\%$)	2000 ($U_n - 33\%$)	3600 ($U_n + 20\%$)	3900 ($U_n + 30\%$)
Střídavá (efektivní hodnoty)	15000	11000 ($U_n - 27\%$)	12000 ($U_n - 20\%$)	17250 ($U_n + 15\%$)	18000 ($U_n + 20\%$)
	25000	17500 ($U_n - 30\%$)	19000 ($U_n - 24\%$)	27500 ($U_n + 10\%$)	29000 ($U_n + 16\%$)
Trakční proudová soustava	Jmenovitý kmitočet	Nejnižší kmitočet		Nejvyšší kmitočet	
	f_n [Hz]	f_{min} [Hz]		f_{max} [Hz]	
Střídavá (po 99,5 % roku)	16,7	16,50 ($f_n - 1\%$)		16,83 ($f_n + 1\%$)	
	50	49,50 ($f_n - 1\%$)		50,50 ($f_n + 1\%$)	
Střídavá (po 100 % doby)	16,7	15,67 ($f_n - 6\%$)		17,33 ($f_n + 4\%$)	
	50	47,00 ($f_n - 6\%$)		52,00 ($f_n + 4\%$)	

4.2 Kmitočet

Ohledně kmitočtů trakční soustavy 25 kV a 15 kV je frekvence 50 Hz a 16,7 Hz (synchronní připojení přes synchronní měniče) dána všeobecnou rozvodnou trojfázovou sítí DS. Platí zde totožné mezní hodnoty jako v distribuční síti uváděné v normě EN 50 160. Nicméně pro kmitočet 16,7 Hz elektrické trakční soustavy bez synchronního připojení k DS platí limity mírně odlišné od frekvencí pro DS. Hodnoty frekvencí 50 Hz i 16,7 Hz pro TV jsou uváděny v normě ČSN EN 50 163 a zobrazeny v Tab. 5 [16] [33].

4.3 Proud

Dle normy ČSN EN 50 388 ed. 2 jsou také stanoveny maximální dovolené proudy vlaků na jednotlivých systémech. Stanovené úrovně proudu platí jak v trakčním, tak i v rekuperačním režimu, pokud je tomu umožněno. Vyšší nebo nižší hodnoty proudu vlaku, musí být uváděny v registru infrastruktury pro každou trať, je-li to požadováno. Maximální

dovolený odebrány proud vlaku se liší v kategoriích jednotlivých států, kterým jsou vybaveni a často i dle konkrétních tratí. Pro konvenční tratě (CR⁶) v ČR TV 25 kV, 50 Hz jsou podmínky limitu 800 A. Pro stejnosměrný systém stejnosměrného TV o hodnotě 3 kV je tato hodnota proudu 3 kA [1].

Pro stejnosměrné TV musí být navíc zajištěné omezení odběru proudu u stojících vlaků. To je zajištěné tak, že nesmí dojít k odběru proudu přes 200 A u systému 3 kV u každého pantografového sběrače. Dle TSI Energie není pro střídavou soustavu omezení stanoveno. Nicméně pro tyto trakční systémy je uvedena hodnota 80 A dle normy ČSN EN 50 367. Účelem těchto omezení odběru proudou stojících vlaků je zamezení bodového přehřívání vodičů a pantografového sběrače, který v daný moment napájí pomocná zařízení [1].

Tab. 6: Maximální dovolený proud vlaku, převzato z [1]

Napájecí soustava	Maximální dovolený proud vlaku [A]												
	Kategorie tratí HS TSI			Kategorie IV, V, VI, VII Tratě CR TSI a klasické tratě									
	I	II	III	MAX.	AT CH DE	BE	CZ	DK	FR	GB	NL	SE	SK
AC 25 kV, 50 Hz	1500	600	500	800	/	500	800	500	500	300	500	500	300
AC 15 kV, 16,7 Hz	1500	900	900	900	900	/	/	/	/	/	/	900	/
DC 3 kV	4000	4000	4000	4000	/	2500	3000	/	/	/	/	/	1000/2000 1 nebo 2 kolejné trati
DC 1,5 kV	/	5000	5000	5000	/	/	5000	2800	5000	/	4000	/	/

5 Studie vlivu rekuperace na spotřebu energie pro specifické jízdní soupravy a jejich cykly

Závěrem této diplomové práce je rozbor a přezkoumání teoretických předpokladů a úvah využití rekuperace v trakčním systému. V úvodu práce je definována fyzikální a technická podstata problému, která se zabývá výpočtem jízdní a trakčních odporů,

⁶ Conventional Railway- konvenční trať, která je součástí transevropské železniční sítě a odpovídá požadavkům příslušných technických specifikací pro interoperabilitu.

spádového brzdění a odporu v oblouku. Tyto podklady jsou nezbytné pro výpočet a zjištění možné rekuperované energie.

5.1 Popis problematiky – zadání

Cílem je početně vyhodnotit vliv rekuperace energie při brzdění pro specifické vlakové soupravy a porovnat rozdílné jízdní cykly, kde se rekuperace podílí na snížení spotřeby energie. Výpočty jsou aplikovány pro čtyři vlakové soupravy různého typu. Liší se celkovou hmotností, maximální rychlostí, mírou zrychlení a zpomalení a cílovým užitím. Všechny tyto čtyři vlakové soupravy uvážím provozovat na stejnosměrném a střídavém systému, abych získal ucelený závěr s porovnáním nejen jednotlivých vlakových souprav na střídavém trakčním systému, ale i porovnání obou systémů využívaných v ČR.

Pro každou jízdní soupravu je vypočten jízdní a trakční odpor. Pro zjednodušení zde nejsou uplatněny odpory z oblouku, náklonu trati či při vjezdu do tunelu. V praxi výpočty těchto odporů probíhají s nejvyššími známými sklony tratí a oblouky, které se reálně vyskytují a každá lokomotiva tak musí být dimenzována dle požadavků zákazníka nebo dle zmíněných limitujících hodnot.

Dále jsou provedeny výpočty možné rekuperované energie při brzdění z počáteční rychlosti. Následně jsem analogicky spočítal spotřebovanou energii při rozjezdu jednotlivé jízdní soupravy a energii spotřebovanou při jízdě konstantní rychlostí.

Další bod zadání zkoumané analýzy je spotřeba jízdních souprav při stání. Tento jev je mnohdy opomíjen, protože trakční pohon nekoná práci. Nicméně abychom se přiblížili realitě, je nezbytné tuto situaci zahrnout do výpočtů, protože stav stání probíhá kdykoliv čekáme na nástup/výstup cestujících nebo na odjezd dle jízdního řádu. Ve všech těchto stavech stání, jízdní souprava odebírá výkon z trakčního vedení pro pomocné pohony, pro klimatizaci nebo topení a další zařízení. V závěru analýzy je zhodnocen rozdíl mezi AC a DC trakčním vozidlem.

Pro stanovení reálně využitě rekuperované energie je stanoven měřící bod v napájecí stanici (nebo v trakční měničce v případě DC systému). Proto jsou ve výpočtech zahrnuty i celkové činné ztráty na vedení, které se promítnou na celkové spotřebě.

Posledním bodem je rozdílnost první a čtvrté vlakové soupravy, které se od zbylých jízdnic souprav liší jízdnicím cyklem. Tyto vlaky na stejné délce trasy mají 8 zastávek a jsou nuceny 8x zastavit a 8x rozjet. Účelem je porovnání dvou rozdílných jízdnic souprav a zjištění, která z těchto dvou konfigurací přinese lepší úsporu energie na stanoveném úseku.

5.2 Specifikace vlakových souprav

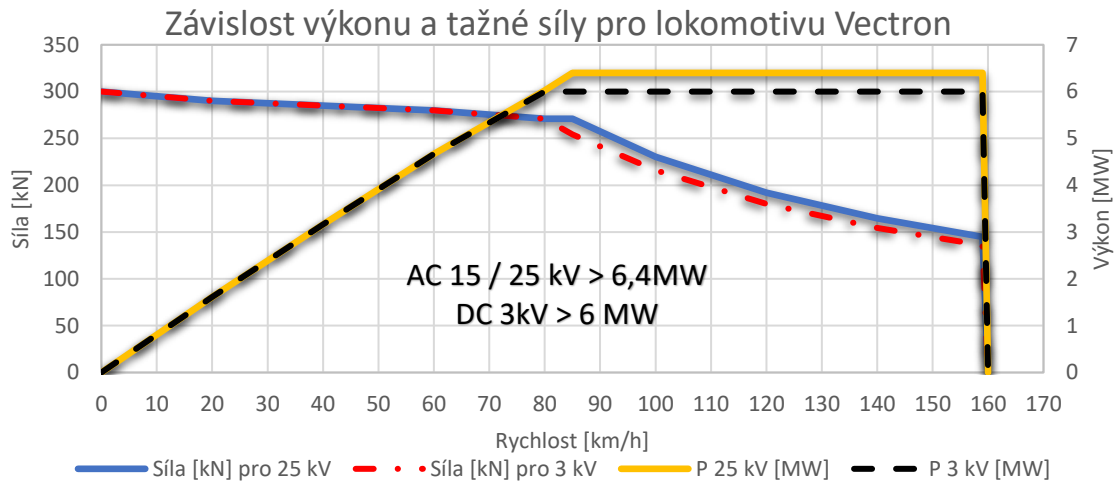
Pro lepší představu jsou režimy jízdy jednotlivých jízdnic souprav znázorněny v obrázcích Obr. 42 až Obr. 45. Obrázky znázorňují průběh jízdy vlaku, dobu stání, maximální rychlost a délku stanoveného úseku.

5.2.1 Osobní vlak

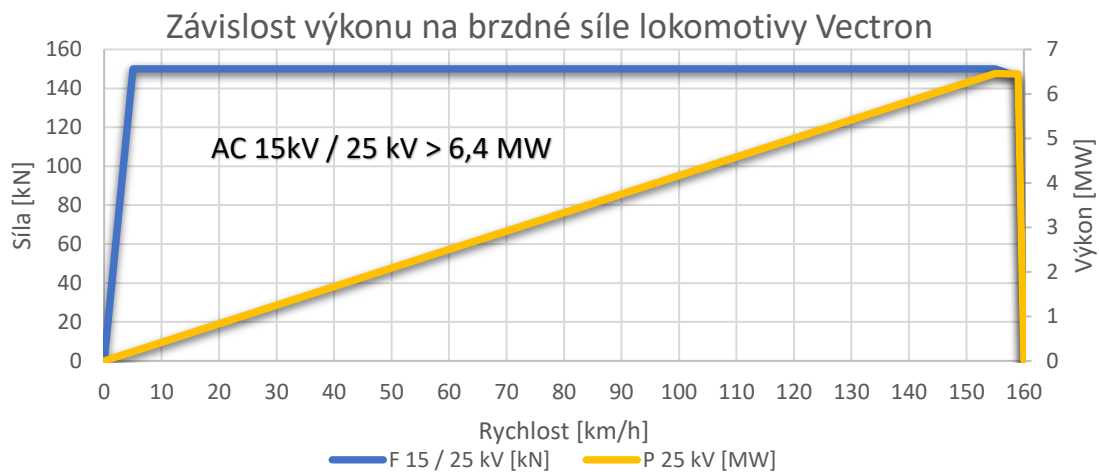
První uvažovaný model jízdnic soupravy představuje osobní vlak o celkové hmotnosti 390 tun. Jízdnic souprava se skládá z pěti čtyřnápravových osobních vozů o celkové hmotnosti 300 tun. Na jednu nápravu odpovídá hmotnost přibližně 15 tun. Vlak je tažen více systémovou lokomotivou Siemens X4-E-Lok-A01 Vectron. Tato lokomotiva se vyznačuje svojí variabilitou a lze ji použít na stejnosměrný i střídavý systém. Proto je vhodná pro modelové příklady a je použita i pro nákladní vlak a expresní vlak. Další informace k lokomotivě jsou v Tab. 7 a grafech znázorňující tažnou sílu a sílu elektrodynamické brzdy.

Tab. 7: Specifikace více systémové lokomotivy Siemens X4-E-Lok-A01 „Vectron“

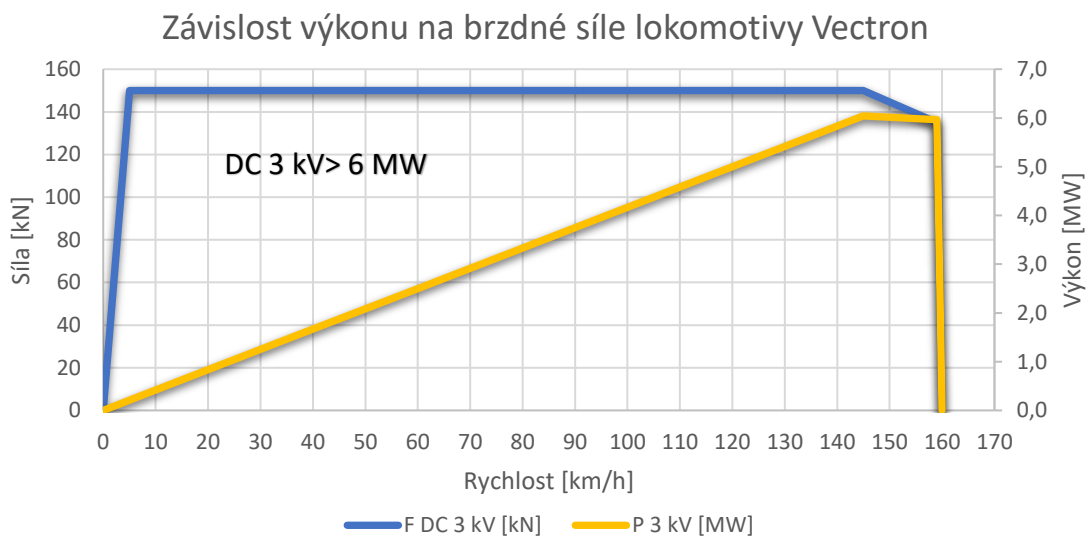
Napěťové systémy	AC 15 kV 16,7 Hz AC 25 kV 50 Hz DC 3 kV DC 1,5 kV
Rozjezdová tažná síla	300 kN
Elektrická brzdná síla (max.)	150 kN
Výkon na obvodu kol (max.)	AC 15 kV 6 400 kW (jízda a rekuperace) AC 25 kV 6 400 kW (jízda a rekuperace) DC 3 kV 6 000 kW (jízda a rekuperace) DC 3 kV 2 600 kW (odporová brzda) DC 1,5 kV 3 500 kW (jízda a rekuperace) DC 1,5 kV 2 600 kW (odporová brzda)
Celková hmotnost (max.)	90 t podle EN 15528:2008
Nápravový tlak (max.)	22,5 t podle EN 15528:2008
Maximální rychlost	160 km/h



Obr. 39: Závislost výkonu na tažné síle lokomotivy Vectron

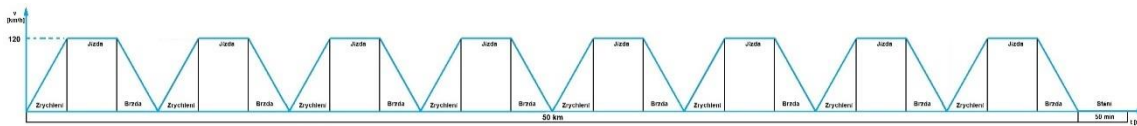


Obr. 40: Závislost výkonu na brzdě síle lokomotivy Vectron pro AC systém 15/25 kV



Obr. 41: Závislost výkonu na brzdě síle lokomotivy Vectron pro DC. systém 3 kV

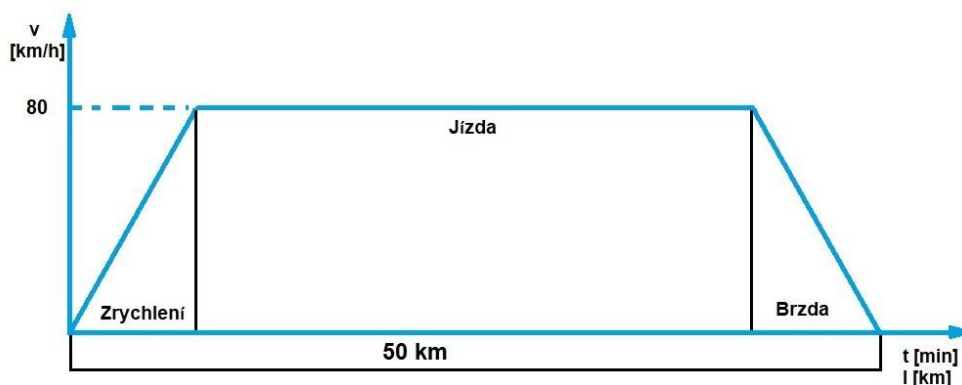
Vstupními daty pro výpočty k osobnímu vlaku dle kapitoly 5.1 jsou maximální rychlost 120 km/h, délka úseku jízdy 50 km. Pro zrychlení a brzdění jsou uvažovány maximální hodnoty 1 m/s^2 , to jsou však meze, aby nedocházelo k nežádoucímu pohybu zavazadel cestujících. Dle jízdního řádu jsou střední hodnoty zrychlení a zpomalení $0,6 - 0,8 \text{ m/s}^2$. Tudíž přesné hodnoty pro zrychlení jsou stanoveny na $0,7 \text{ m/s}^2$ a pro konstantní brzdění $0,8 \text{ m/s}^2$. Tato vlaková souprava má na daném úseku 8 zastávek a je nucena 8x zastavit. Na konci úseku je část, kdy vlak 50 min stojí.



Obr. 42: Průběh jízdy osobního vlaku s lokomotivou Vectron

5.2.2 Nákladní vlak

Model nákladního vlaku představuje jízdní souprava o celkové hmotnosti 2000 tun. Vozy jsou nákladní ložené a hmotnost všech vagonů je cca 1910 tun. Vlak je tažen též lokomotivou „Vectron“ jako u předchozího modelu osobního vlaku, více systémová lokomotiva Vectron. Maximální rychlost je stanovena na 80 km/h, délka úseku je totožná jako v předchozí kapitole, též 50 km. Kvůli vysoké hmotnosti celé soupravy je zrychlení stanoveno na pouhých $0,2 \text{ m/s}^2$ a brzdění představuje $0,3 \text{ m/s}^2$.

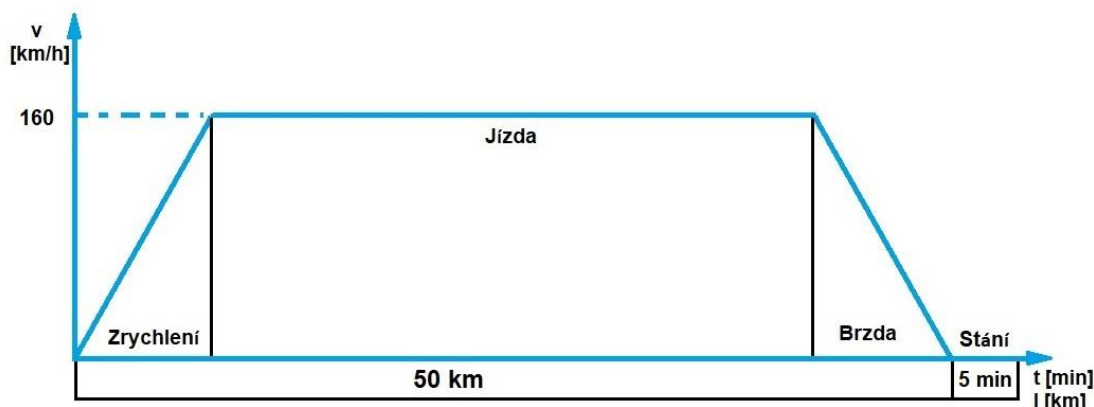


Obr. 43: Průběh jízdy nákladního vlaku s lokomotivou Vectron

5.2.3 Expresní vlak

Expresní vlak má celkovou hmotnost 600 tun. Z toho 90 tun tvoří více systémová lokomotiva Vectron jako v předchozích dvou případech. U expresního vlaku je počítáno s 9 osobními vozy o celkové hmotnosti 510 tun. Maximální rychlost, kterou expresní vlak dosahuje je 160 km/hod, délka úseku pro zkoumaný model je též 50 km. Zrychlení je

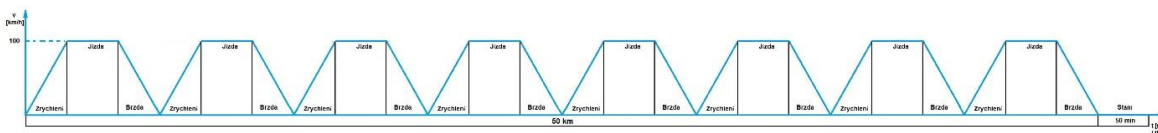
stanoveno nižší, než u osobního vlaku kvůli hmotnosti na $0,6 \text{ m/s}^2$ a zrychlení též nižší - $0,7 \text{ m/s}^2$. Expresní vlak má navíc stanovenou délku stání na konci trasy po dobu 5 minut.



Obr. 44: Průběh jízdy expresního vlaku s lokomotivou Vectron

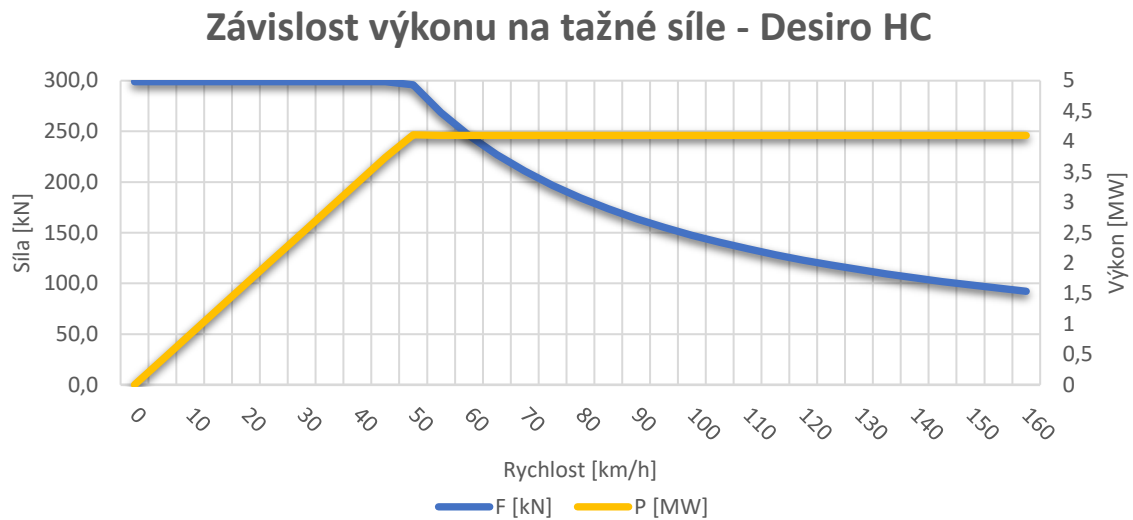
5.2.4 Regionální – soupravový vlak

Poslední model jízdní soupravy představuje regionální vlak. Jedná se o soupravový vlak, který se liší od osobního především svojí celistvostí. Zkoumané výsledky jsou spočteny pro vlak Desiro HC od společnosti Siemens. Tento model se skládá ze tří dvoupodlažních vozů uprostřed a dvou hnacích vozů na každém konci. Hmotnost celé této soupravy bez cestujících je 199 tun. Pod označením Desiro HC lze najít i jiné konfigurace vlakové soupravy, která se liší uvažovaným počtem vozů pro cestující. V tomto konkrétním případě budeme uvažovat maximální dosahovanou rychlost 100 km/h , úsek zůstává stejný, 50 km a míra zrychlení/zpomalení je stanovena totožně na $0,9 \text{ m/s}^2$. Odlišnost od ostatních modelů představuje jízdní cyklus. Desiro HC má na daném úseku 50 km 8 zastávek, kde se musí 8x rozjet a 8x brzdit. Proto je zrychlení a zpomalení přizpůsobeno vyšší hodnotě. Na konci tratě tento regionální vlak má danou dobu stání, která je stanovena na 50 minut.

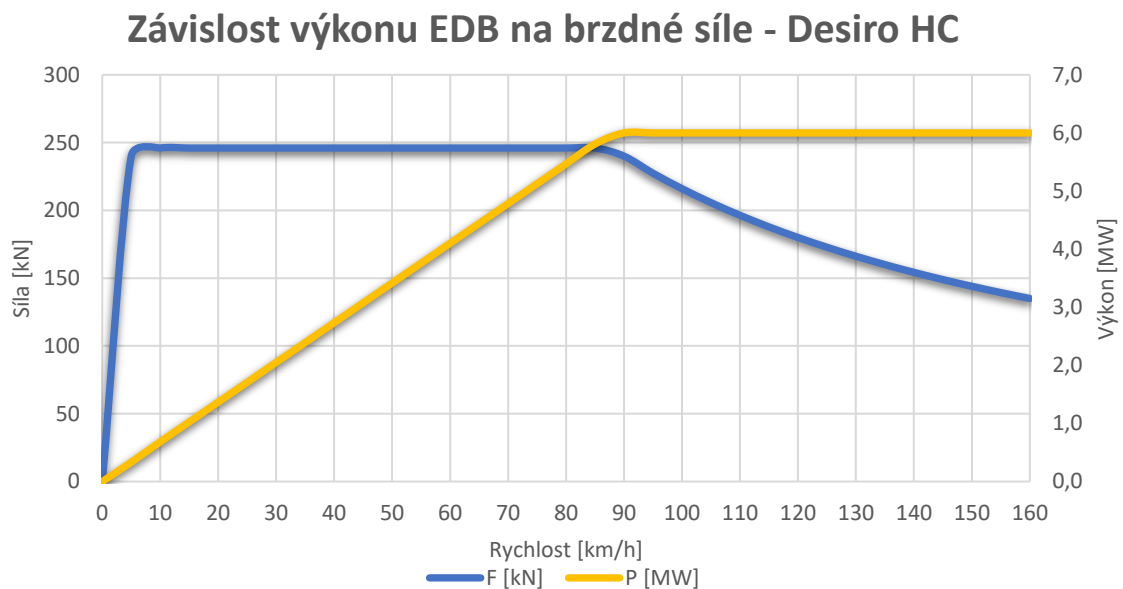


Obr. 45: Průběh jízdy regionálního vlaku Desiro HC

Tento soupravový vlak disponuje tažným výkonem 4 MW a EDB dokáže vyvinout výkon až 6 MW . Hodnoty platí jak pro střídavý, tak stejnosměrný systém.



Obr. 46: Závislost výkonu na tažné síle soupravy Desiro HC



Obr. 47: Závislost výkonu na brzdě síle soupravy Desiro HC

5.3 Výpočet jízdních odporů, trakčních odporů

Kapitola 1.3 poskytuje veškerý teoretický základ pro získání konkrétních výsledků modelových jízdních souprav. Prvním krokem je potřeba dosadit do vzorců (1.11) a zjistit tak celkovou brzdou sílu. Po dosazení při použití součinitele rotačních hmot $\xi = 1,07$ vychází hodnoty takto:

$$F_{Bcelk} = 390 \cdot 0,8 \cdot 1,07 = 333,84 \text{ kN} \quad (5.1)$$

Dalším krokem je stanovení součinitele jízdního odporu pro jednotlivou rychlost dle vztahů (5.2), (5.3) a (5.4) níže. Jde o empirické vztahy, které jsou generovány na základě reálných pokusů a můžeme se dopátrat rozličných vztahů v různých literaturách [6] [34].

Vzhledem k tomu, že lineární člen ovlivní celkový odpor minimálně, lze ho v praktických příkladech zcela zanedbat a zjednodušený tvar rovnice přechází do tvaru $O_j = a + c \cdot V^2$. Z vypočtených hodnot dále stanovíme trakční odpor O_{TRAK} dle hmotnosti a s použitím vztahu (1.12) vykreslíme křivku brzdě síly, která musí být vyvinuta vlakovými brzdami viz Obr. 48.

- Pro čtyřnápravovou elektrickou lokomotivu:

$$O_{jEL} = 2,45 + 0,000414 \cdot V^2 [N/kN] \quad (5.2)$$

- Pro čtyřnápravové osobní vozy:

$$O_{jV} = 1,35 + 0,00033 \cdot V^2 [N/kN] \quad (5.3)$$

Součinitel jízdního odporu O_{jVLAK} je udáván v poměru ke hmotnostem jednotlivých částí vlaku. Uvedené vztahy jsou vynásobeny hmotností a gravitační konstantou 9,81.

$$O_{jVLAK} = m_{EL} \cdot O_{jEL} \cdot g + m_V \cdot O_{jV} \cdot g [N/kN] \quad (5.4)$$

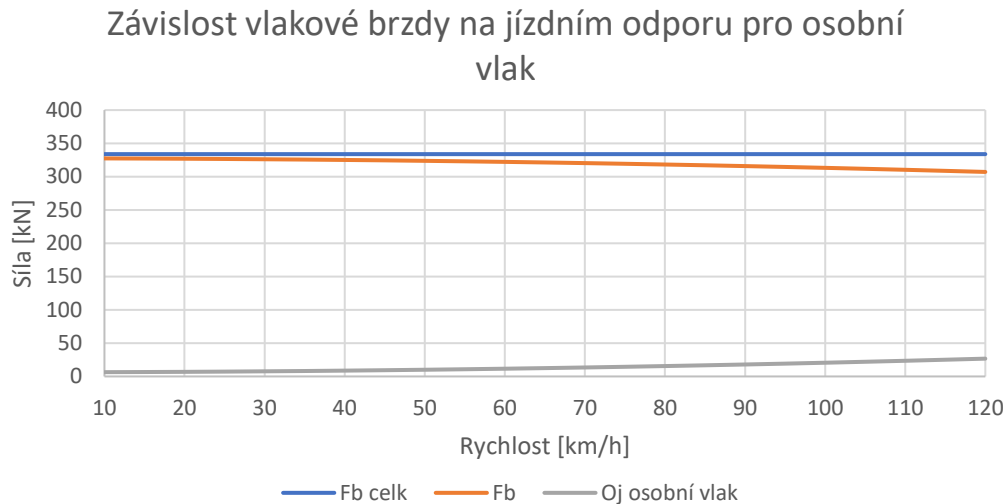
Kde: m_{EL} značí hmotnost lokomotivy v [t] a m_V je celková hmotnost vozů v [t].

Tab. 8: Zvyšování jízdního odporu s narůstající rychlostí

v[km/h]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Ojvlak [kN]	6,38	6,89	7,67	8,71	10,03	11,60	13,45	15,57	17,95	20,60	23,51	26,70

V obrázku níže můžeme vidět závislost traťového odporu na rychlosti, který s narůstající rychlostí stoupá od 6 do 27 kN, a to samé platí pro brzdnu sílu v opačném pohledu. Střední hodnota trakčního odporu v celém pásmu je 14,1 kN. Pokud budeme brát v úvahu tuto hodnotu, můžeme zjistit střední hodnotu součinitele trakčního odporu.

$$O_{TRAK} = \frac{O_{jVLAK}}{(m_{EL} + m_V) \cdot g} = \frac{14,1}{390 \cdot 9,814} = 3,68 N/kN \quad (5.5)$$



Obr. 48: Závislost celkové brzdě síly na základě EDB brzd F_B a jízdního odporu O_{jvlak} na rychlosti.

Z vypočtené střední hodnoty trakčního odporu lze stanovit střední hodnotu brzdě síly EDB brzd F_B , která je dána vztahem (1.12).

$$F_B \cong 333,84 - 14,1 \cong 319,74 \text{ kN} \quad (5.6)$$

Nicméně nejvyšší možná brzdě síla elektrodynamické brzdy je dána adhezí lokomotivy podle vztahu (1.14):

$$F_{EDBmax} = F_{adh.max} = \mu_{max} \cdot m_{adh} \cdot g = 0,15 \cdot 90 \cdot 9,814 \cong 132,49 \text{ kN} \quad (5.7)$$

Zbývá určit maximální výkon elektrodynamické brzdy, který se odehrává na začátku brzdění a kinetickou energii vlaku na začátku brzdění, kterou je možné navrátit pomocí rekuperace. Pro výkon vycházím ze vztahu (1.16) a výpočet energie z (1.2):

$$P_{EDBmax} = \frac{132,49 \cdot 120}{3,6} = 4416,3 \text{ kW} \quad (5.8)$$

Pro ostatní simulované modely je postup výpočtu jízdních odporů a brzdě síl analogický. Pro nákladní vlak je stanoven součinitel rot. hmot 1,07, jízdní odpor nákladních vozů je použit dle [35]. Výkon na začátku brzdění z 80 km/h je 2,94 MW.

$$O_{jV} = 1,3 + 0,00015 \cdot V^2 [\text{N/kN}] \quad (5.9)$$

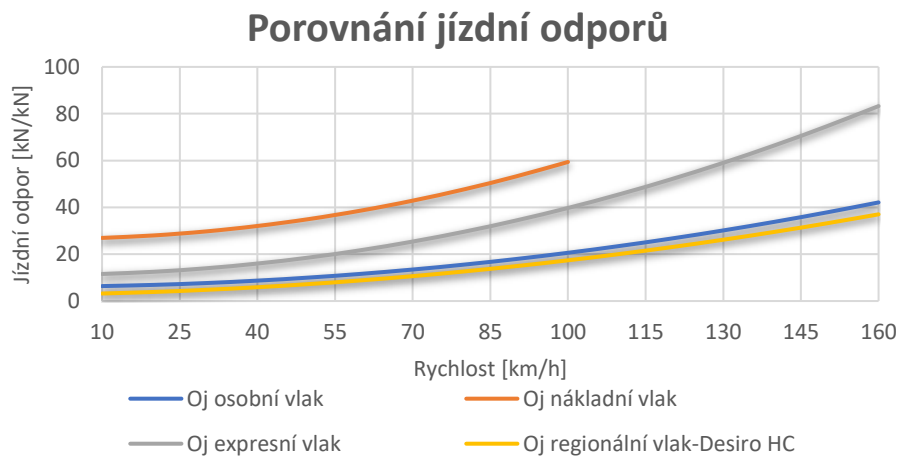
Pro expresní vlak je vybrán součinitel rot. hmot 1,06 a jízdní odpor zvolen dle [34]. Výkon EDB expresního vlaku na začátku brzdění z rychlosti 160 km/h je 5,89 MW.

$$O_{jV} = 1,8 + 0,000476 \cdot V^2 [\text{N/kN}] \quad (5.10)$$

Regionální soupravový vlak (dále EMU – Electrical Multiple Unit) je brán jako celek a jízdní odpor soupravy Desiro HC je stanoven dle [4]. Součinitel rot. hmot je zde stanoven na hodnotu 1,21 a výkon EDB na začátku brzdění je 4,06 MW.

$$O_{jV} = 1,417 + 0,01684 \cdot V + 0,00058 \cdot V^2 [\text{N/kN}] \quad (5.11)$$

Je nezbytné podotknout, že ačkoliv výkony EDB lokomotivy Vectron nebo soupravy Desiro HC jsou rozdílné, vždy byl použit součinitel adheze, který se používá pro výpočty jízdní odporů. Závěrem je porovnání jízdní odporů jednotlivých souprav. Graf znázorňuje velikost jízdního odporu při dosažené max rychlosti. Křivka pro nákladní vlak je ukončena v bodě pro 100 km/h. To proto, že jízdní odpor od tohoto bodu může růst jinak a není známo doposud jak. Nákladní vlaky nedosahují rychlosti nad 100 km/h.



Obr. 49: Srovnání jízdních odporů jednotlivých simulovaných modelů

5.4 Výpočet EDB – energie, čas, vzdálenost

Pro výpočet energie EDB brzdy, která bude využita při brzdění potřebujeme znát kinetickou energii na počátku brzdění ze vztahu (1.2):

$$E_K = 1,072 \cdot 1,07 \cdot 390 \cdot 120^2 \cdot 10^{-2} = 64\,417 \text{ Wh} \doteq 64,4 \text{ kWh} \quad (5.12)$$

Dále je potřeba znát energii na překonání trakčního odporu, ale abychom mohli tuto hodnotu získat, musíme nejdříve provést výpočet brzdné vzdálenosti a tím i času, po který bude jízdní souprava brzdit do nulové rychlosti.

$$t = \frac{v}{(3,6 \cdot a)} = \frac{120}{(3,6 \cdot 0,8)} = 41,67 \text{ s} \quad (5.13)$$

$$l = \frac{1}{2} a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,8 \cdot 41,67^2 = 694,44 \text{ m} \quad (5.14)$$

Na překonání trakčního odporu je dle (1.8) potřeba energie o hodnotě:

$$E_O = 3,68 \cdot 390 \cdot 2,724 \cdot 10^{-3} \cdot 0,69444 = 2,72 \text{ kWh} \quad (5.15)$$

Vlakovými brzdami je potřeba zmařit energii o hodnotě:

$$E_B = E_K - E_O = 64,42 - 2,72 = 61,7 \text{ kWh} \quad (5.16)$$

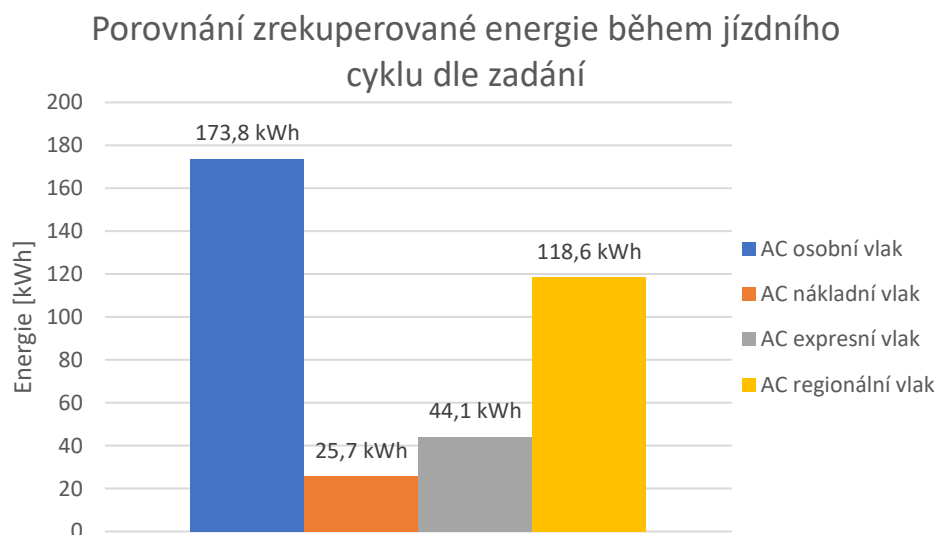
Výsledkem této kapitoly by mělo být zřejmé, jaké množství energie je možné zrekuperovat elektrodynamickou brzdou. Omezení spočívá v možnostech adheze, kde jsme limitováni ubrzdít maximálně 132,49 kN na stanovené dráze 694,44 m.

$$\frac{F_{EDBmax}}{F_B} \cdot 100 = \frac{132,49}{319,75} \cdot 100 = 41,43 \% \quad (5.17)$$

Možnost, jak určit zrekuperovanou energii elektrodynamickou brzdou je uvažovat konstantní brzdnou sílu F_{EDBmax} od počáteční rychlosti brzdění do nulové rychlosti, tedy na celé vzdálenosti.

$$E_{EDB} = \frac{F_{EDBmax} \cdot l}{3,6} = \frac{132,49 \cdot 0,69444}{3,6} = 25,56 \text{ kWh} \quad (5.18)$$

Stejně je postupováno i v ostatních třech případech, kdy získáme čas a vzdálenost brzdné dráhy a průměrnou ušetřenou energii pomocí EDB s účinností lišící se pro střídavý a stejnosměrný trakční pohon [36].



Obr. 50: Porovnání zrekuperované energie při brzdění jízdni soupravy

5.5 Výpočet zrychlení – energie, čas, vzdálenost

Výpočet spotřebované energie při rozjezdu jízdní soupravy na požadovanou rychlost vychází z jízdních odporů, tažné síly a výkonu tažného trakčního vozidla podobně jako tomu je u získání parametrů pro brzdění. Vstupními parametry pro výpočet je hmotnost soupravy, zadané zrychlení, požadovaná rychlost. Z těchto parametrů je postup následovný.

Prvním krokem je potřeba dosadit do vzorců (1.11) a zjistit tak celkovou tažnou sílu.

$$F_{tahcelk} = 390 \cdot 0,7 \cdot 1,07 = 292,11 \text{ kN} \quad (5.19)$$

Jízdní a trakční odpor zůstává stejný, jako v případě brzdění, protože jízdní souprava je totožná a maximální rychlost též.

Střední hodnota tažné síly:

$$F_{tah} \cong 292,11 - 14,1 \cong 278,01 \text{ kN} \quad (5.20)$$

Maximální tažná síla je odvozena dle Tab. 4, kde součinitel adheze pro zrychlení jízdní soupravy je $\mu_{max} = 0,2$.

$$F_{max} = F_{adh.max} = \mu_{max} \cdot m_{adh} \cdot g = 0,2 \cdot 90 \cdot 9,814 \cong 176,65 \text{ kN} \quad (5.21)$$

Maximální rozjezdový výkon lokomotivy je stanoven totožně jako v předchozí kapitole.

$$P_{max} = \frac{176,65 \cdot 120}{3,6} = 5888,4 \text{ kW} \quad (5.22)$$

Kinetická energie při dosažení stanovené rychlosti je stejná jako v kapitole 5.4. Před výpočtem kinetické energie, která je nezbytná pro překonání trakčního odporu, musíme stanovit vzdálenost a čas pro dosažení rychlosti 120 km/h se zrychlením 0,7 m/s².

$$t = \frac{v}{(3,6 \cdot a)} = \frac{120}{(3,6 \cdot 0,7)} = 47,62 \text{ s} \quad (5.23)$$

$$l = \frac{1}{2} a \cdot t^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 47,62^2 = 793,65 \text{ m} \quad (5.24)$$

Na překonání trakčního odporu je dle (1.8) potřeba energie o hodnotě:

$$E_0 = 3,68 \cdot 390 \cdot 2,724 \cdot 10^{-3} \cdot 0,79365 = 3,1 \text{ kWh} \quad (5.25)$$

Nyní je potřeba stanovit koeficient mezi maximální adhezní silou stanovenou dle Tab. 4 a střední hodnotou tažné síly, která je nezbytná pro dosažení požadované rychlosti. Tento koeficient určí spotřebovanou energii během jízdy k dosažení stanové rychlosti.

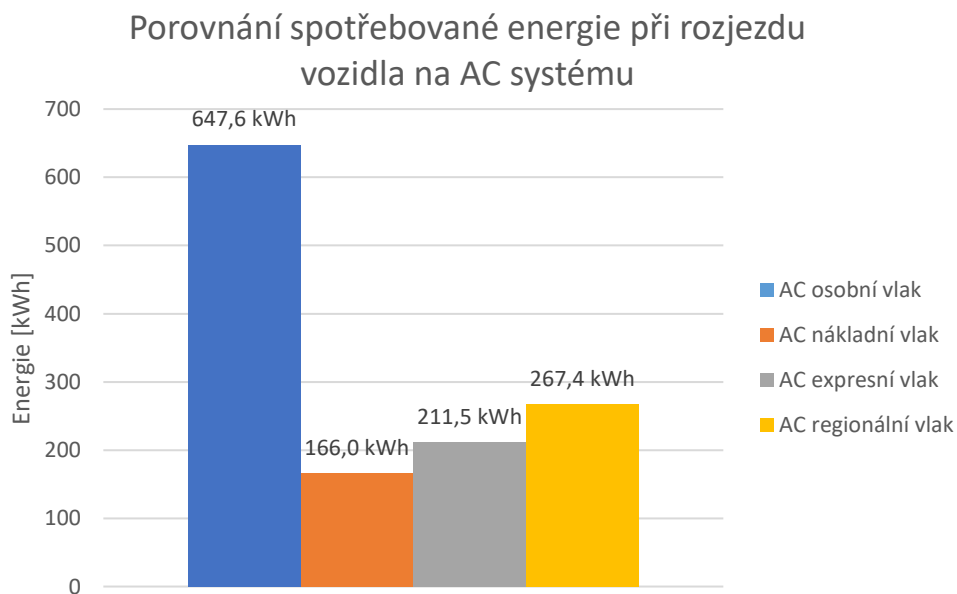
$$koef = \frac{F_{tah}}{F_{max}} = \frac{278,01}{176,65} = 1,57 \quad (5.26)$$

$$E_a = \frac{F_{max} \cdot l}{3600} \cdot koef = \frac{176,65 \cdot 793,65}{3600} \cdot 1,57 = 61,29 \text{ kWh} \quad (5.27)$$

Celková spotřebovaná energie poté vychází sečtením energie pro překonání trakčního odporu a energie ztracené na rozjezd. Nesmíme ale zapomenout na účinnost trakčního pohonu, který se liší pro střídavá a stejnosměrná vozidla. Celková účinnost střídavého vozidla je 85 % a vozidla na stejnosměrném systému 90 % [36].

$$E_{celk} = \frac{(E_a \cdot 1,072) + E_0}{0,85} = 80,95 \text{ kWh} \quad (5.28)$$

Totožný postup je aplikován pro zbylé jízdní soupravy. Obr. 51 ukazuje porovnání spotřebované energie jízdní soupravy při rozjezdu na stanovenou vzdálenost se započítáním 85 % účinnosti pro střídavý systém.



Obr. 51: Porovnání spotřeby energie pro rozjezd jízdní soupravy na stanovenou rychlost

5.6 Výpočet konstantní jízdy – energie, čas, vzdálenost

Z předešlých kapitol plyne, že na jízdní soupravu o jmenovité rychlosti působí jízdní odpory, které se zvyšují s narůstající rychlostí. Aby jízdní souprava udržela konstantní rychlost, je potřeba vyvinout takovou energii, která překoná stanovený jízdní odpor.

Ve vztazích v předchozích dvou kapitolách byla počítána energie na překonání trakčního odporu, tzv. výběhová energie. Celkovou energii během konst. rychlosti získáme vynásobením výběhové energie za kilometr a délky trati po kterou jízdní souprava jede jmenovitou rychlostí. Čas během jízdy konstantní rychlostí získáme ze vztahu (5.30).

$$t = \frac{s}{v} \cdot 60 = \frac{48,51}{120} \cdot 60 = 24,26 \text{ min} \quad (5.29)$$

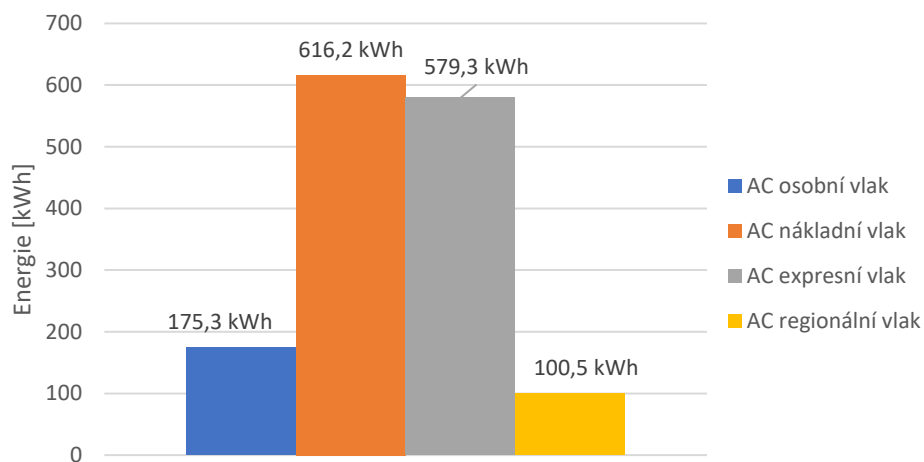
Uvedené vztahy (5.30), (5.31), (5.32) platí pro osobní vlak, další jízdní soupravy jsou vypočteny stejně.

$$E_o = 3,68 \cdot 390 \cdot 2,724 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 3,91 \text{ kWh} \quad (5.30)$$

$$l_{\text{výběh}} = l - l_{\text{brzda}} - l_{\text{rozjezd}} = 50 - 0,79365 - 0,694,44 = 48,51 \text{ km} \quad (5.31)$$

$$E_{\text{celk}_{\text{výběh}}} = E_o \cdot l_{\text{výběh}} = 3,91 \cdot 48,51 \text{ kWh} \quad (5.32)$$

Porovnání spotřebované energie během jízdy



Obr. 52: Porovnání spotřebované energie během jízdy bez započtení účinnosti

5.7 Výpočet spotřeby energie během procesu stání

Cílem je získat energetické poznatky ohledně spotřeby energie jízdních souprav během stání a započíst stavy, kdy souprava stojí, do celkové spotřeby jízdního cyklu a získat přesnější data o možné rekuperované energii.

V zadání je doba stání stanovena pro expresní vlak, který stojí po dobu 5 min a osobní vlak s regionálním vlakem Desiro HC, který stojí po dobu 50 min. Vstupními daty pro energetický výpočet jsou magnetizační proud transformátoru během stání a napájení systémů mimo trakční pohon. Pomocné systémy odebírají průměrný střední činný výkon 11 kW, 18 kW v případě Desiro HC. Magnetizační proud transformátoru v případě lokomotivy Vectron je 2,5 A a v případě soupravy Desiro HC je proud $2 \times 0,9$ A. Střední hodnota spotřeby topení je počítána pro průměrnou roční teplotu v ČR $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, vycházející z dat ČHMÚ [37]. Dle interních informací průměrná spotřeba topení pro jeden vůz při venkovní teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ je 35 kW. Ideální teplota, na kterou je nastavený termostat topení ve vozech je $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Energetická náročnost spotřeby topení na jeden vůz při venkovní průměrné teplotě:

$$P_{1\emptyset} = 10,43\text{ kW} \quad (5.33)$$

Expresní vlak je složen z 9 osobních vozů pro cestující, celková střední hodnota spotřeby topení je:

$$P_{top} = 9 \cdot P_{1\emptyset} = 93,83\text{ kW} \quad (5.34)$$

Celková spotřeba pomocných pohonů lokomotivy Vectron a topení pro 9 vozů:

$$P_{top+pomoc} = P_{top} + P_{pomoc} = 104,83\text{ kW} \quad (5.35)$$

Magnetizační ztráty transformátoru při stavu stání uvažujeme jako stav „naprázdno“:

$$P_z = U_{in} \cdot I_{mag} = 25\,000 \cdot 2,5 = 62,5\text{ kW} \quad (5.36)$$

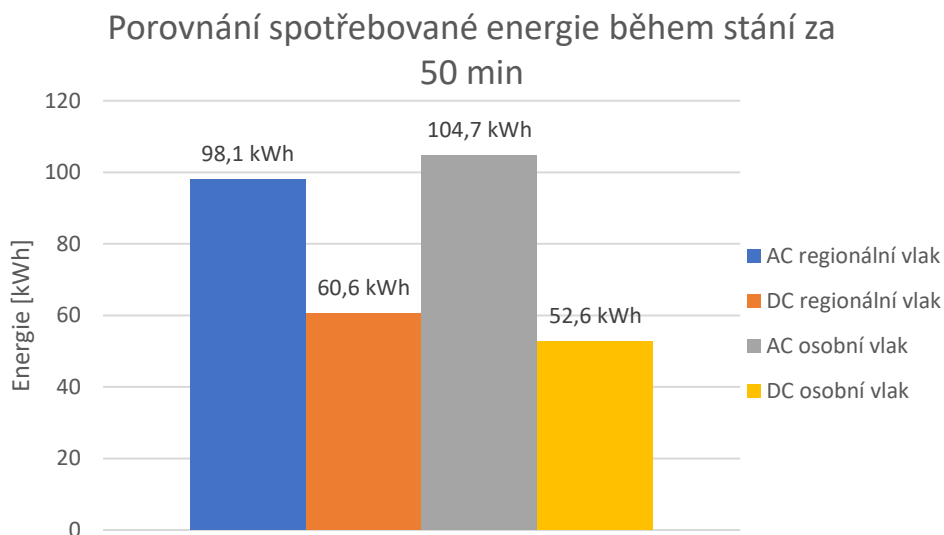
Celkové ztráty na prázdko během stavu stání pro expresní vlak:

$$P_{zcelk} = P_z + P_{top+pomoc} = 167,33\text{ kW} \quad (5.37)$$

Spotřebovaná energie během 5 minut stání:

$$E_5 = P_{zcelk} \cdot 5 \cdot 60 = 13,94\text{ kWh} \quad (5.38)$$

Stejný postup následuje pro výpočet energetických ztrát pro regionální vlak, Desiro HC, kde magnetizační proud je 1,8 A a energetická náročnost topení vagonů je násobena koeficientem 1,75 z důvodu dvoupodlažního provedení. V grafu Obr. 53 můžeme vidět porovnání obou jízdních souprav a vliv ztrát transformátoru na prázdko na celkovou náročnost.



Obr. 53: Rozdíl osobní vlak / Desiro HC a AC/DC systém během stání

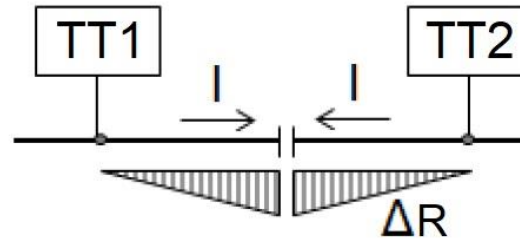
5.8 Ztráty v trakčním vedení

Trakční vedení, též TV se skládá nejčastěji z trolejového drátu a nosného lana, případně zesilovacích lan pro zvýšený proudový odběr v daném úseku a ze zpětného kolejnicového vedení pro zpětný proud. Tato skladba TV je charakteristická pro stejnosměrný systém. TV pro střídavý systém používá též trolejový drát, nosné lano a jako zpětné vedení kolejnice. Nejsou zde potřeba zesilovací lana ke zlepšení parametrů TV. Trolejové vedení je měděné nebo ze slitin mědi pro zvýšení pevnosti a tvrdosti a je zde podstatný rozdíl v použití množství materiálu mezi jednotlivými systémy, protože proud procházející střídavým trakčním vedením je až o řád nižší než u soustavy stejnosměrné a největší ztráty ve vedení se odvíjí právě od přenášeného proudu vodiči [38] [39]. Zpětné vedení se u obou systémů podstatně liší vlastnostmi a způsobem provedení uzemnění. DC zpětné vedení nesmí být přímo uzemněno, aby nedocházelo k průniku bludných proudů do země. Ty jsou nebezpečné pro jakékoliv zemní kovové vedení. Tím, že kolejnice nejsou uzemněny je odpor kolejnic proti zemi co možná nejvyšší. Naproti tomu AC kolejnice musí být uzemněny. Účelem je vodivě spojit kolejnice se zemí a získat tak co nejnižší induktivní napěťové úbytky, které vzniknou ve vedení zpětného proudu [40].

5.8.1 Stanovení trati a výpočet ztrát

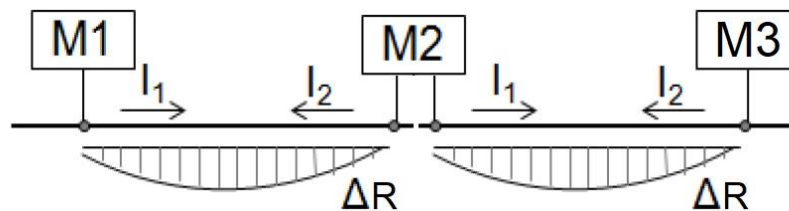
Dle zadání víme, že délka zkoumaného úseku, na kterém budou probíhat výpočty rekuperace je 50 km. Odlišnosti ve způsobu napájení TV mezi DC a AC tratí byly popsány v kapitole 1.4.1, 1.4.3 a 3.2. Je tudíž zřejmé, že v případě AC tratě se jedná o jeden úsek

mezi trakčními transformovny rozdělený neutrálním úsekem uprostřed z důvodu nemožnosti napájet úsek oboustranně. Činný odpor bude od trakční transformovny každým metrem nabývat až do rozděleného úseku a následně postupně klesat k druhé TT [41].



Obr. 54: Rozložení odporu AC vedení [40]

V případě DC tratě je zapotřebí pro 50 km délku trati dvou úseků napájenými oboustranně a zapotřebí jsou tři trakční měnírny.



Obr. 55: Rozložení odporu DC vedení [40]

Činné ztráty v TV se skládají z měrného ohmického odporu trolejového drátu případně zesilovacích lan, která napomáhají u DC tratí, a kolejnicového vedení. Dalším faktorem je míra procházejícího proudu vedením. Proud v určení činných ztrát TV hraje významnou roli, protože ztráty na vedení se zvyšují se čtvercem nárustu proudu [38].

$$P_{zTV} = R_{TV} \cdot I^2 \quad [\Omega; A; W] \quad (5.39)$$

Měrná ohmická hodnota mědi ρ , je dle fyzikálních tabulek $18 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$. Musíme však počítat s tím, že při opotřebení ohmická hodnota stoupá, a tak se pro výpočty používají ohmické hodnoty s částečným možným opotřebením trolejových drátů [38].

$$R_{trolej} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 18 \cdot \frac{1}{150} = 0,12 \Omega/\text{km} \quad (5.40)$$

$$R_{trolej90\%} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 18 \cdot \frac{1}{0,9 \cdot 150} = 0,133 \Omega/\text{km} \quad (5.41)$$

Takto lze jednoduše dojít ke stanovení ohmického odporu vedení pro stejnosměrné a střídavé vedení. Celkovou hodnotu ohmického odporu získáme paralelní kombinací trolejového drátu a nosného lana a následně sériovým řazením odporu kolejnic. Za zmínku také stojí fakt, že při výpočtech je uvažován činný odpor jen jedné kolejnice z důvodu kolejnicových styků se spojkami, které zvyšují odpory [39]. Hodnoty pro stejnosměrné vedení, které jsou použity ve výpočtech ztrát jsou [38] [41]:

- Trolejový drát 150 mm² Cu a nosné lano 100 mm² číní 0,088 Ω/km
- Kolejové zpětné vedení číní 0,0075 Ω/km
- Celkový odpor TV pro DC systém číní 0,0955 Ω/km

Hodnoty ohmického odporu pro střídavou soustavu jsou následující [41]:

- Trolejový drát 100 mm² Cu číní 0,18 Ω/km

5.8.2 Rozjezdový a brzdový proud, energie ztracená ve vedení

Charakteristika odebíraného proudu lokomotivy při rozjezdu vychází z průběhu odebíraného výkonu, který je patrný v trakčních charakteristikách v kapitole 5.2.1 a 5.2.4 pro lokomotivu Vectron i regionální soupravu Desiro HC.

Abych mohl stanovit střední činný výkon během doby rozjezdu je zapotřebí získat data odebíraného proudu při rozjezdu, který je s každým okamžikem proměnný. Vstupními parametry jsou data z kapitol 5.4 a 5.5, kde získávám časy a vzdálenost pro rozjezd jednotlivé soupravy. Znáím též cílovou rychlost, kterou je potřeba dosáhnout, zrychlení, a i trakční sílu vozidel závislou na rychlosti z trakčních charakteristik.

Proud je pro každou jízdní soupravou získáván s časovým intervalem 1 s, nezávisle na zrychlení vozidla, který je dostačující pro získání průběhu proudu, ale hlavně střední hodnoty ztrát během rozjezdu. Okamžitý proud získám z proměnného odebíraného výkonu lokomotivy během rozjezdu, který vychází ze zrychlení a tažné síly.

$$P_{in} = \frac{(F \cdot a)}{\eta_{stř}} + P_{pomoc} = [N; \frac{m}{s^2}; -; W] \quad (5.42)$$

Odebíraný vstupní výkon je samozřejmě ovlivněný navíc odebíraným výkonem pomocných pohonů, které se neuvažují v charakteristice trakčního pohonu. Pro lokomotivu Vectron jsou uváděné hodnoty pomocných pohonů 100 kW (max) a pro Desiro HC 70 kW. Jedná se ale o stále proměnnou veličinu, která se mění na základě mnoha faktorů. Může se jednat především o komplexní chlazení trakčního pohonu, které je řízeno automaticky na základě čidel. V případě výpočtu ztrát energie při rozjezdu a brzdění, jsou uvažovány krajní případy, kdy jsou pomocné pohony využity na maximum.

Dalším aspektem, který je vnesen do výpočtu odebíraného výkonu je účinnost trakčních vozidel a všeobecně celková účinnost systému. Hrají zde roli především účinnosti motorů, měničů, transformátorů a převodovek. V Tab. 9 jsou uvedeny hodnoty účinností komponent [36].

Tab. 9: Účinnost jednotlivých celků systému

ČÁST POHONU	ÚČINNOST [%]
Motor	95
Transformátor	95
Měnič	98
Převodovka	98

Ač se zdá, že jednotlivé účinnosti jsou vysoké, jako celek mají podstatný vliv na ztráty. Pro chod na stejnosměrném systému vycházím s orientační celkovou účinností 90 % a v případě střídavého systému s 85 %. Účinnost je zde snížena vlivem trakčního transformátoru.

Výpočet celkové účinnosti trakčního pohonu [36]:

$$\eta_{celk} = \eta_{mot} \cdot \eta_{trans} \cdot \eta_{m\acute{e}ni\acute{c}} \cdot \eta_{p\acute{r}evod} \cdot (1 - \beta) \quad (5.43)$$

Kde:

- η_{celk} celková účinnost
- η_{mot} účinnost motoru
- η_{trans} účinnost transformátoru
- $\eta_{m\acute{e}ni\acute{c}}$ účinnost měniče
- $\eta_{p\acute{r}evod}$ účinnost převodovky

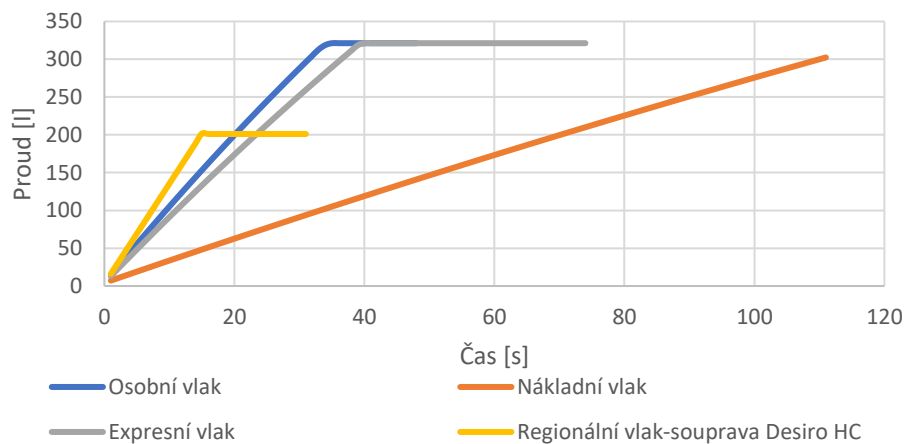
- $(1-\beta)$ proměnný příkon pomoc. pohonů

Navíc v případě střídavého systému je nutno brát v úvahu také účinník. Pro výpočty jsou brány krajní hodnoty, které jsou uvedeny v 1.1.2.

Po získání vstupního příkonu, který lokomotiva odebírá z TV mohou jednoduše určit odebíraný proud, který se úměrně zvyšuje s výkonem a rychlostí lokomotivy do jmenovitého bodu maximální rychlosti.

$$I_{in} = \frac{\frac{P_{in}}{U_{in}}}{\cos \varphi} [W; V; -; A] \quad (5.44)$$

Porovnání průběhu odebraného proudu na AC systému



Obr. 56: Porovnání odběru proudu jízdních souprav z TV

Ztrátový výkon na vedení je určen dle vztahu (5.39) pro každý časový okamžik v rozmezí celkové doby rozjezdu:

$$P_{zTV25kV0,1km} = 0,018 \cdot 80^2 = 115,2 W \quad (5.45)$$

Pro získání střední hodnoty ztrát během procesu rozjezdu je nutné získat střední hodnotu výkonu z dat během rozjezdu, kdy proud je s každým časovým okamžikem měněn a činný odpor vedení je proměnný se vzdáleností jízdní soupravy od trakční transformovny. Výsledné energetické ztráty na vedení získáme úpravou středního činného ztrátového výkonu za časový úsek rozjezdu jízdní soupravy.

$$E_{zTV25kVrozjezd} = \frac{P_{zTV25kVrozjezd} \cdot t_{rozjezd} \cdot 60}{3600} [W; min; kWh] \quad (5.46)$$

Takto postupuji stejně pro výpočet ztrát na střídavém tak i stejnosměrném vedení pro všechny jízdní soupravy. Analogický postup následuje i v případě brzdění se započítáním ztrát vzniklých v trakčním vozidle.

5.8.3 Proud konstantní jízdy, energie ztracená ve vedení

Výpočet ztrát během konstantní jízdy se od předešlých výpočtů liší. Není zde potřeba počítat proměnný proud a získávat tak okamžité hodnoty ztrátového výkonu za časový úsek rozjezdu.

Proud během jízdy bude konstantní. Odběr proudu bude takový, jaký je výkon potřebný k vyvinutí síly na překonání jízdního odporu, který byl počítán v kapitole 5.3. Nyní se dostaneme k postupu získání odebíraného proudu jízdní soupravou a následným výpočtem činných ztrát ve vedení.

Výsledný proud získáme dle vztahu:

$$I_{inmaxv} = \frac{\frac{(O_{jmax} \cdot v_{max}) + P_{pomoc}}{\eta}}{U_{in}} = \frac{(P_{maxv} + P_{pomoc})}{\eta} \cdot \frac{1}{U_{in}} \quad [N; \frac{km}{h}; W; -; V; A] \quad (5.47)$$

Kde:

- O_{jmax} – jízdní odpor pro konstantní jízdu vyjádřený v kN
- V_{max} – konstantní maximální stanovená rychlost
- P_{pomoc} – výkon pomocných pohonů
- U_{in} – jmenovité napětí TV
- P_{maxv} – výkon při jmenovité maximální rychlosti ($F \cdot v$)
- η – účinnost daného pohonu

Postup výpočtu má stejný sled jako ve výpočtech v předchozí kapitole. Dle vzorce (5.39) získám činné ztráty ve vedení za čas konstantní jízdy, který je roven:

$$t_{konst} = \frac{S_{konst}}{v} \cdot 60 \left[km; \frac{km}{h}; min \right] \quad (5.48)$$

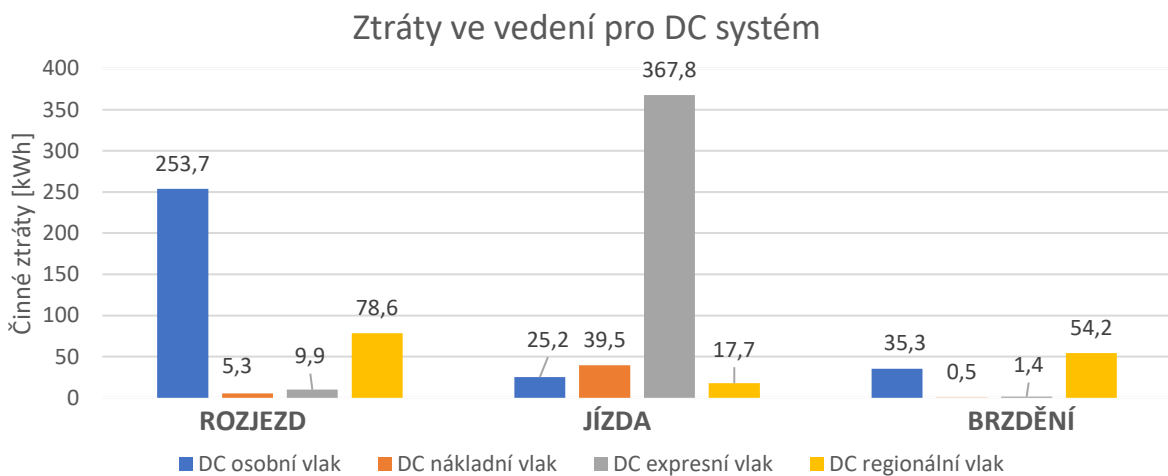
$$S_{konst} = S_{celk} - S_{rozjezd} - S_{brzda} \text{ [km]} \quad (5.49)$$

Kde:

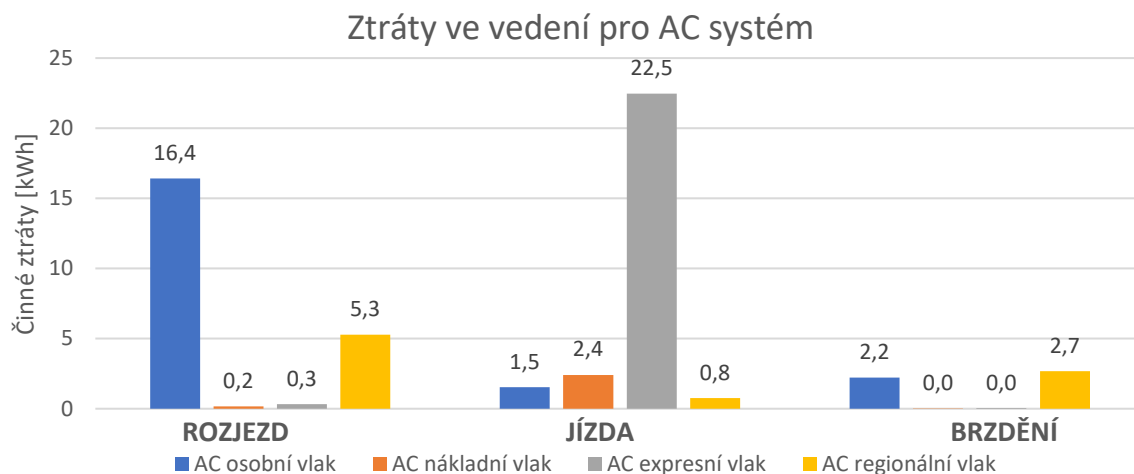
- t_{konst} – celkový čas, kdy jízdni souprava jede konstantní rychlostí
- S_{konst} – celková dráha, kdy jízdni souprava jede konstantní rychlostí
- v – maximální zadaná rychlost jízdni soupravy
- S_{celk} – celková zadaná vzdálenost (50 km)
- $S_{rozjezd}$ – vzdálenost, kterou se jízdni souprava rozjíždí na max rychlost
- S_{brzda} – vzdálenost, kterou jízdni brzdi z max rychlosti

A následně převedeme na spotřebovanou energii v kWh vynásobením t_{konst} .

$$E_{zTV25kVjizda} = \frac{P_{zTV25kVkonst} \cdot t_{konst} \cdot 60}{3600} [W; min; kWh] \quad (5.50)$$



Obr. 57: Grafické znázornění činných ztrát na DC vedení



Obr. 58: Grafické znázornění činných ztrát na AC vedení

Z grafů výše můžeme vidět, že ztráty na stejnosměrném vedení jsou mnohonásobně vyšší než ztráty na střídavém systému.

5.9 Zhodnocení výsledků

Poslední kapitola je věnována analýze, která má za cíl ověřit teoretické předpoklady z první kapitoly. Výsledkem rozsáhlé početní analýzy je Obr. 59, který ukazuje možnou zrekuperovanou energii pomocí EDB pro jednotlivé vlakové soupravy provozované na AC i DC systému. Pro získání těchto poznatků bylo nutné:

- vyhodnotit jízdní odpory každé vlakové soupravy,
- stanovit zrekuperovanou energii během brzdění,
- spočítat energii spotřebovanou při jízdě, rozjezdu a stání,
- určit střední ztráty ve vedení pro oba systémy.

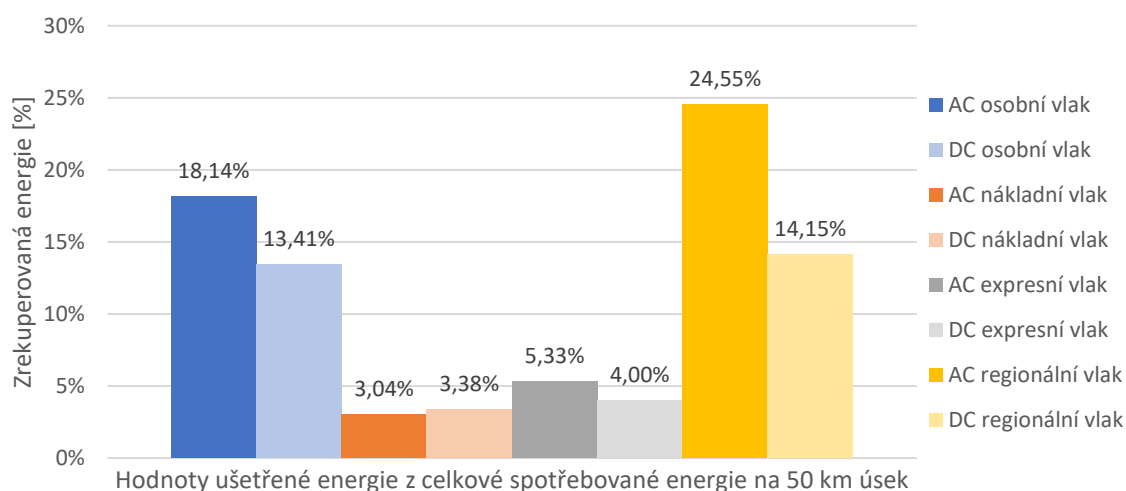
Z Obr. 59 je viditelné, že vlakové soupravy pod označením osobní vlak a regionální vlak mají nejvyšší míru zrekuperované energie. To je dáno stanoveným cyklem, kde tyto jízdní soupravy měly osm zastávek na úseku 50 km oproti zbylým dvou vlakovým soupravám, které na úseku 50 km nezastavovaly. Jedním ze závěrečných stanovisek je, že rekuperace energie se osvědčí v případech, kde vlaky často zastavují a dochází tak k brzdění a využití potenciálu EDB.

Dalším významný rozdíl platí znovu pro vlakové soupravy osobní vlak a regionální vlak. Graf Obr. 59 porovnává procentuální míru rekuperované energie na systému AC i DC a lze vidět příznivější čísla pro systém AC. V případě regionálního vlaku jde až o více než 10 % zrekuperované energie mezi AC a DC systémem.

Ačkoliv osobní vlak a regionální vlak mají stejné cykly jízdy i dobu stání, v případě AC systému nastává rozdíl zrekuperované energie více než o 6 %. Tento fakt ovlivňují do jisté míry jízdní odpory, hmotnost souprav, rozdílná maximální rychlost, míra zrychlení/zpomalení a nepatrně spotřeba během stání

Poslední zvláštností, kterou ukazuje Obr. 59 je procentuální porovnání nákladního vlaku na AC a DC systému. Zde je vidět opačný jev, než u ostatních vlakových souprav a to ten, že na DC systému vlaková souprava je schopna zrekuperovat více procent. Tento fakt je dán započtením 50 min stání na konci úseku, kde magnetizační ztráty transformátoru pro AC systém převyšují spotřebu nad DC systémem. Pokud by graf respektoval nulové stání, jako je v zadání, rozdíl by se téměř vyrovnal.

Procentuální zhodnocení ušetřené energie pro jednotlivé vlakové soupravy na stejnosměrném a střídavém trakčním systému



Obr. 59: Grafické znázornění reálně navrácené energie pro stanové cykly jízdních souprav

6 Závěr

První kapitola této diplomové práce představuje normy, předpisy, které jsou určeny pro trakční zařízení. Jsou zde zmíněny podstatné body z norem, které jsou spjaty s následnou rekuperací vozidel v trakčním systému. V návaznosti na normy je uvedena technická a fyzikální podstata jízdy a brzdění trakčního vozidla. Další část úvodní kapitoly popisuje existující napájecí systémy trakčního vedení v ČR a jsou shrnuty klady a zápory jednotlivých systémů.

Druhá kapitola pojednává o principu rekuperace a následně o trakčním pohonech a jejich možnostech řízení. Jsou vysvětleny základní principy, funkce pohonu a jednotlivých částí pro řízení. Kapitola je pojata v časové linii a zároveň i rozdělena podle napájecího systému, což s sebou nese jistou spojitost. Pohony jsou popsány od počátků, kdy se trakce rozvíjela a pohony z této doby slouží do dnes na dožití, až po současnost, kde jsou pohony řízeny na základě počítačových algoritmů. Dle zadání jsou vysvětleny nevýhody a výhody pohonů mezi sebou a vznikající obtížnosti při jejich provozu.

Třetí kapitola spojuje problematiku ze strany pevných trakčních zařízení a z pohledu distribuční sítě. Jelikož tyto problémy se vyskytují většinou na přechodu pevného trakčního zařízení a napájení z distribuční sítě, je lepší jednotlivé problematiky vysvětlit komplexně v návaznosti na sebe. Kapitola zmiňuje vliv impedance vedení a porovnává systémy s rozdílnou frekvencí, poukazuje na způsob napájení trakčního vedení, které je rozdílné pro AC i DC systém. Je zde vysvětleno, proč nelze AC TV napájen oboustranně a jaká rizika vznikají rekuperací energie. Také jsou popsány negativní vlivy starších lokomotiv a jejich nezbytné řešení pro splnění podmínek stanovených dle norem [1].

Poslední kapitola je zaměřena na početní analýzu, kde je záměrem zjistit míru ušetřené energie pomocí EDB. Za účelem získání tohoto konkrétního výsledku napomůže kapitola technické a fyzikální podstaty v úvodní kapitole 1.3. Celý výpočet je obohacen zadáním, kde míra rekuperované energie je zjišťována mezi rozdílnými vlakovými soupravami s rozdílnými jízdními cykly. Aby bylo možné dosáhnout ideálních výsledků, musí být spočteny pro každou jízdní soupravu jízdní odpory, energie spotřebovaná při rozjezdu, jízdě a stavu stání. Následně rekuperovaná energie při brzdění. Do výpočtů zasahují i ztráty na vedení, protože měřící bod je umístěn v trakční napájecí stanice

(trakční měnič v případě DC). Ztráty na vedení jsou jednotlivě počítány pro rozjezd, jízdu a brzdění z důvodu proměnného proudu a proměnného odporu vedení, který nabývá s délkou troleje.

Početni analýza ukazuje, že nejvyšší míra rekuperované energie vzniká u vlakových souprav, které často zastavují. Obr. 59 ukazuje až téměř 25 % ušetření energie u regionálního vlaku Desiro HC z celkové odebrané energie touto jednotkou.

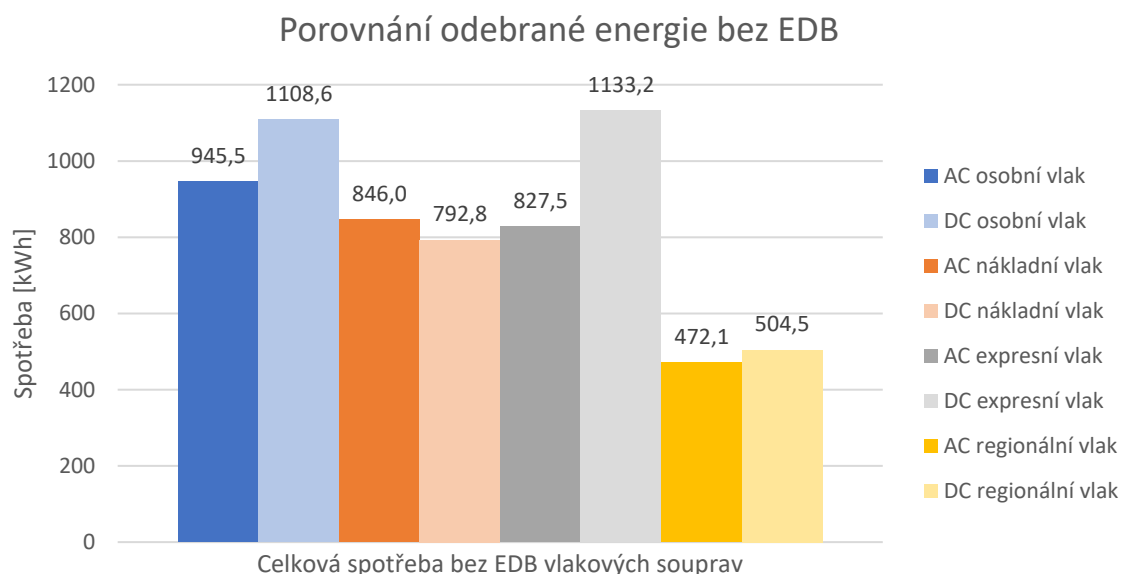
Tento graf také značí, že na míru zrekuperované energie má vliv daný napájecí systém. Při porovnání AC a DC systému, kde je provozována jednotka Desiro HC, je rozdíl více než 10 % v ušetřené energii.

Nevýhoda nastává u systémových lokomotiv provozovaných na AC systému s trakčním transformátorem, kde je celková účinnost nižší o 5 %, než u lokomotivy provozované na DC systému. Pokud by byla účinnost systémů totožná, míra zrekuperované energie na AC systému by vzrostla o jednotky procent a byla by ještě více příznivější než doposud. S rozdílností provozu lokomotiv na AC a DC soustavě je spojen i stav, kdy lokomotiva stojí a trakční pohon je v nečinnosti. V tomto momentu má lokomotiva na AC systému nevýhodu ve větším odběru energie, která je zapříčiněná magnetizačními ztrátami trakčního transformátoru, který je ve stavu „naprázdno“.

Výpočet ztrát na vedení je vidět v kapitole 5.8.3, kde jsou grafy Obr. 57 a Obr. 58 porovnávající míru ztrát. Zde je markantní rozdíl ve ztracené energii vlivem průchozího proudu. V tomto ohledu je AC systém výhodnější a ztráty na vedení jsou u tohoto systému více než 15x nižší než u DC systému.

Výpočty jízdních odporů nejsou přímou podstatou této práce, ale jsou nezbytným výpočtem pro získání cílových výsledků. Z výpočtů je patrné, že jízdní odpor vlakové soupravy roste s nabývací rychlostí dle Obr. 49. To vede k závěru, že při konstantní jízdě je odebíraný proud úměrný jízdnímu odporu, protože lokomotiva musí vyvinout takovou sílu, aby překonala jízdní odpor. V tomto případě platí, že čím menší je jízdní odpor, tím menší proud bude odebírán během konstantní jízdy a vlaková souprava odebere menší množství energie. To dokazuje i Obr. 60, kde celková odebraná energie, bez rekuperované energie při brzdění, je nejnižší u regionálního vlaku s nejnižším jízdním odporem, a naopak

expresní vlak se vyznačuje v případě DC systému velmi vysokou odebranou energií, protože musí během jízdy rychlostí 160 km/h překonávat nejvyšší jízdní odpor.



Obr. 60: Spotřebovaná energie vlakových souprav na úseku 50 km pro stanovený cyklus

Analýza také potvrdila, že hmotnost vlakové soupravy má vliv na množství odebrané energie a možnost ovlivnit dosažení maximální rychlosti. Nejtěžší vlaková souprava – nákladní vlak má nejvyšší hmotnost 2000 tun. Kvůli hmotnosti je omezené zrychlení a rozjezd na stanovenou rychlost probíhá nejpomaleji. Za čas, kdy se vlaková souprava rozjíždí jsou postupem odebrány vysoké proudy a tím vzniká vysoký odběr energie a ztráty na vedení.

Poslední zjištění z analýzy vychází z vlivu hodnot zpomalení vlakových souprav na míru zrekuperované energie. Výpočty potvrdily, že čím menší je zpomalení vlakové soupravy a vlaková souprava využívá EDB delší dobu, tím větší množství energie během procesu brzdění lze navrátit. To je dáno poměrem užití EDB brzdy a třecích brzd, které musí dopomoci ubrzdit vlakovou soupravu. Pravdou je, že při brzdění velkým výkonem EDB rostou ztráty ve vedení kvůli vysokým proudům.

Všechny kapitoly shrnují rozdíl mezi AC a DC trakcí, protože dle mě jen tak dokonale ukázat problémy, nevýhody, výhody trakčního napájecího systému 25 kV 50 Hz. Práce tak vytváří hodnotnější informace, které jsou uceleny a celkově přesahují zadání této práce.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Drážní zařízení – Napájení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanicí) a drážními vozidly pro dosažení interoperability. ČSN EN 50388 ED.2. Technické normy, 2013.
- [2] KRŮŽ, Michal. Vyšší harmonické, jejich vliv na instalace a rozvody, opatření proti jejich působení. *ProfiElektrika.cz* [online]. 2014, 9 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/vyssi-harmonicke-jejich-vliv-na-instalace-a-rozvody-opatreni-proti-jejich-pusobeni/view>
- [3] ELSTNER, Vlastislav. Energetická bilance v elektrické trakci [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/10739>. Disertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [4] Základy kolejové dopravy 2 – Interní prezentační materiály Siemens mobility: Interní prezentační materiály Siemens mobility. Praha: Siemens, 2016.
- [5] PYTELKA, Jiří. Specifické problémy rekuperace na stejnosměrném trakčním systému 3 kV [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/45796/PytelkaJ_SpecifickeProblemy_LM_1cast_2012.pdf?sequence=6&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [6] ŠIROKÝ, Jaromír. Mechanika v dopravě I: Kolejová vozidla [online]. Ostrava, 2003 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/skr_mv.pdf
- [7] HLAVA, Karel a Ladislav MLYNÁŘÍK. Práce a výkon při rekuperaci [online]. 28. Praha: Vědeckotechnický sborník ČD, 2009 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195363/2809.pdf/74c6595d-de78-47db-ad1e-b5c3a384de60>
- [8] LEDNICKÝ, Denis. Maximalizace efektu rekuperačního brzdění [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64105/F6-DP-2014-Lednický-Denis-DP%202014%20DL.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [9] VINTR, Martin. *Trakční vlastnosti lokomotivy s velkým instalovaným výkonem* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/28814/1/Trakcni%20vlastnosti%20lokomotivy%20s%20velkym%20instalovanim%20vykonem.pdf>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Ing. Martin Pittermann, Ph.D.
- [10] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce III*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-708-2945-1.
- [11] MOLEK, Tomáš. Elektrifikace českých železnic. OENERGETICE.cz [online]. 2015, 4 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektrifikace-ceskych-zeleznic/>
- [12] ŠIMEK, Luděk. Jednotná napájecí soustava trakčního vedení v ČR. Vlaky.net [online]. 2017, 14 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z:

- <https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/6516-Jednotna-napajeci-soustava-trakcniho-vedeni-v-CR/>
- [13] HRDLOVICS, Vojtěch. Systémové řešení napájení trakčních vozidel [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/69504/F3-DP-2017-Hrdlovics-Vojtech-DP_Hrdlovics.pdf. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [14] LÍPA, Jakub. Unifikace trakčních napájecích soustav na sítích SŽDC a ŽSR [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: http://cena-dekana.fd.cvut.cz/prezentace/9_rocnik/lipa.pdf. Cena děkana Dopravní fakulty ČVUT v Praze. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [15] RUBEŠ, Václav. Evropa pod měděnou pavučinou aneb souboj střídavého a stejnosměrného proudu [online]. 2016 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/tema/evropa-pod-medenou-pavucinou-aneb-souboj-stridaveho-a-stejnoserneho-proudu/-10558/19,0,./>
- [16] DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. *Trakční napájecí soustavy* [online]. Pardubice, 2015 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/59028/DolecekR_TrakcniNapajeci_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Studijní opora. Univerzita Pardubice.
- [17] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-771-1.
- [18] ZEMAN, Karel a Jiří CIBULKA. *Elektrické pohony: Základní principy*. Učební materiály pro studijní obor AEL. Plzeň, 2016.
- [19] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I: Pro kombinované a distanční studium*. Učební materiály pro studijní obory. Ostrava, 2003. Dostupné také z: <http://homen.vsb.cz/~ste37/Elektricke%20pohony%202018/03f%20-%20Vykonova%20elektronika%20I.pdf>
- [20] HOŠEK, Jan. *Návrh měniče budícího obvodu trakčního motoru elektromobilu* [online]. Praha, 2013 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61181/F3-DP-2015-Hosek-Jan-hosek.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Miroslav Lev.
- [21] ŽIŽKA, Pavel. *TRAKČNÍ MĚNIČE VELKÝCH VÝKONŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16035/Diplomova%20prace.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [22] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonová elektronika I: Učební text* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hav278/Vykonove_polovodicove_systemy_I/Studijni_opory/Polovodicove_soucastky_pro_VE.pdf. Studijní materiály pro studijní obor Elektrické

- stroje, přístroje a pohony Fakulty elektrotechniky a. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [23] ČERNÍK, Martin. *Výkonová elektronika* [online]. Technická univerzita v Liberci. Liberec: ESF CZ.1.07/2.2.00/28.0050, 2014 [cit. 2019-05-16]. ISBN 978-80-7494-160-3. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/7154/Vykonova_elektronika_text.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [24] ŠIMÁNEK, Jiří, Vladimír KUDYN a Luboš KRÁTKÝ. *Bezpečná funkce pevných trakčních zařízení při rekuperaci elektrických hnacích vozidel* [online]. 31. Praha: ČD, 2011 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195366/3111.pdf/354385f9-da68-4868-acf7-699a1a241c04>
- [25] FRIEDLOVÁ, Simona. *Topologie měničů napětí pro trakční pohony* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/23111/1/BP%20Friedlova.pdf>.
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Ing. Ladislav Poljak.
- [26] PAVELKA, Jiří a Zdeněk ČEŘOVSKÝ. *VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA* [online]. I. Praha: Vydavatelství ČVUT, 200n. 1. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://cvut.falconis.cz/semestr-4/ve1/vykonova-elektronika-Cerovsky-Pavelka.pdf>
- [27] *Usměrňovače - elektronická prezentace: Přednáška- výkonová elektronika*. Technická univerzita v Liberci. Liberec: Investice do rozvoje a vzdělávání, 2013.
- [28] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce II.: vozidla s asynchronním trakčním motorem*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-813-8.
- [29] *Stahovačky přežitek nebo nutnost. K-Report český dopravní server* [online]. /: Milan Procházka, 2007 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.k-report.net/clanky/stahovacky-prezitek-nebo-nutnost/?kapitola=1>
- [30] MARSON, Servin. *High Speed Rail Electric-Power Supply Network* [online]. Prague, 2016 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65257/F3-DP-2016-Servin%20Marson-Dalva%20Lionor-Dalva%20Lionor%20Servin%20Marson%20-%20Master%20Thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diploma Thesis. CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE. Vedoucí práce Prof. Josef Tlustý Ing., CSc.
- [31] BERLÍNSKÝ, Jiří. *Návrh jednotné napájecí soustavy na železnici* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74058/F6D-DP-2017-Berlinsky-Jiri-Navrh%20jednotne%20napajeci%20soustavy%20na%20zeleznici.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Michl.

- [32] *Active Balancer* [online]. /: Siemens, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/rail-solutions/rail-electrification/ac-traction-power-supply/converter/pages/rab-plus.aspx>
- [33] Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav. ČSN EN 50163 ED.2. Technické normy, 2005.
- [34] Jízdní (vozidlové) odpory. *Www.railian.com* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.railian.com/teorie/jizdniodpory.html>
- [35] KRÁLÍK, Martin. *HODNOCENÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ KONTEJNEROVÝCH VLAKŮ* [online]. Pardubice, 2018 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/70454/KralikM_HodnoceniJizdnich_TM_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Ing. Tomáš Michálek, Ph.D.
- [36] SODOMKA, Tomáš. *Energetická náročnost železniční dopravy ve spojení Evropa - Asie* [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/46605/SodomkaT_EnergetickNarocnost_RD_2012.pdf?sequence=3. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.
- [37] *Meteorologická pozorování územní teploty v ČR pro rok 2018* [online]. Praha: ČHMÚ, 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/informace-pro-vas/rocnivyhodnoceni/meteorologicka-pozorovani#>
- [38] GROSSMANN, Václav. *Šíření rázové vlny atmosférického původu v trakčním vedení stejnosměrné soustavy 3 kV* [online]. Pardubice, 2009 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/33580/GrossmannV_Sireni_razove_KH_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y. DIPLOMOVÁ PRÁCE. UNIVERZITA PARDUBICE DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA. Vedoucí práce Ing. Karel Hlava CSc.
- [39] *Napájení elektrifikovaných tratí: Energetika kolejové dopravy*. VŠB. Ostrava, /. Dostupné také z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/phv/PDP_energetika_1.pdf
- [40] SKALA, Pavel. *Analýza zpětné cesty elektrického napájení železničního trakčního vozidla* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70088/F3-DP-2017-Skala-Pavel-%5BAnalýza%20zpětné%20cesty%20elektrického%20napájení%20zeleznického%20trakčního%20vozidla%5D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Josef Tlustý, CSc.
- [41] HLAVA, Karel a Jaromír Hrubý. *Ztráty v napájecí soustavě* [online]. Praha: Vědeckotechnický sborník ČD č. 32/2011, 2011 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195369/3201.pdf/9a95e429-60d6-4903-ba9d-164e4245ee2d>

Seznam tabulek

TAB. 1: HODNOTY MAXIMÁLNÍCH ZKRATOVÝCH PROUDŮ PŘI PORUŠE NA TRAKČNÍM VEDENÍ	14
TAB. 2: VYSVĚTLENÍ GRAFU PŘÍPUSTNÉHO ÚČINÍKU V ZÁVISLOSTI NA ODEBÍRANÉM VÝKONU [1]	15
TAB. 3: HODNOTY SOUČINITELE ROTAČNÍCH HMOT	24
TAB. 4: HODNOTY SOUČINITELE ADHEZE [6]	29
TAB. 5: JMENOVITÁ NAPĚTÍ A JEJICH PŘÍPUSTNÉ MEZNÍ HODNOTY A DOBY TRVÁNÍ, PŘEVZATO Z [33].....	67
TAB. 6: MAXIMÁLNÍ DOVOLENÝ PROUD VLAKU, PŘEVZATO Z [1].....	68
TAB. 7: SPECIFIKACE VÍCE SYSTÉMOVÉ LOKOMOTIVY SIEMENS X4-E-LOK-A01 „VECTRON“	70
TAB. 8: ZVYŠOVÁNÍ JÍZDNÍHO ODPORU S NARŮSTAJÍCÍ RYCHLOSTÍ	75
TAB. 9: ÚČINNOST JEDNOTLIVÝCH CELKŮ SYSTÉMU	86

Seznam obrázků

OBR. 1: ZOBRAZENÍ POŽADAVKŮ NORMY NA KAPACITNÍ A INDUKTIVNÍ ÚČINÍK [1].....	15
OBR. 2: POSTUP STUDIE KOMPATIBILITY NÁVRHU NOVÉHO ZAŘÍZENÍ PRO TV [1].....	21
OBR. 3: FÁZE POHYBU VOZIDLA [1],.....	22
OBR. 4: ENERGETICKÁ NÁROČNOST JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ DOPRAVY [4].....	24
OBR. 5: ENERGETICKÁ NÁROČNOST DOPRAVY V ZÁVISLOSTI NA RYCHLOSTI, F_A – AERODYNAMICKÁ SÍLA, C_x – ČINITEL TVARU (1,13), S – ČELNÍ PLOCHA VOZIDLA (8- 12 m ²) PŘEVZATO Z [4].....	26
OBR. 6: POROVNÁNÍ KOLEJÍ S ROZDÍLNOU ADHEZÍ, PŘEVZATO Z [4].....	29
OBR. 7: NAPÁJECÍ SOUSTAVY V EVROPĚ, PŘEVZATO Z [15].....	31
OBR. 8: HIERARCHIE PŘEDPISŮ V ŽELEZNIČNÍ DOPRAVĚ [13].....	37
OBR. 9: BLOKOVÉ SCHÉMA DC POHONU NA 3 kV SYSTÉMU S MOŽNOSTÍ REKUPERACE [18].....	39
OBR. 10: REŽIM JÍZDA A BRZDĚNÍ DC POHONU/SPÍNÁNÍ STEP UP/DOWN MĚNIČE [18].....	40
OBR. 11: FUNKCE STRÍDAČE [23].....	41
OBR. 12: SCHÉMA - 1F NAPĚŤOVÝ STRÍDAČ [18].....	41
OBR. 13: SCHÉMA VOZIDLA S ASYNCHRONNÍM MOTOREM NA DC 3kV [18].....	42
OBR. 14: 1F NEŘÍZENÝ DVOU PULZNÍ USMĚRŇOVAČ.....	43
OBR. 15: VÝKONOVÝ OBVOD POHONU S ASYNCHRONNÍM MOTOREM BEZ MOŽNOSTI REKUPERACE S BRZDĚNÍM DO ODPORNÍKU [18].....	44
OBR. 16: REVERZAČNÍ USMĚRŇOVAČ – ANTI PARALELNÍ ZAPOJENÍ DVOU 3F MŮSTKŮ [18] ..	44
OBR. 17: PROVOZNÍ OBLASTI ČTYŘ KVADRANTOVÉHO USMĚRŇOVAČE [25].....	45
OBR. 18: PŘECHODOVÝ JEV POHON – BRZDĚNÍ S REVERZAČNÍM USMĚRŇOVAČEM [18].....	46
OBR. 19: BLOKOVÉ SCHÉMA REKUPERAČNÍHO POHONU S REVERZAČNÍM USMĚRŇOVAČEM BEZ BRZDNÉHO ODPORNÍKU [18].....	46
OBR. 20: ČASOVÉ PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU PRO RŮZNÉ ŘÍDÍCÍ ÚHLY USMĚRŇOVAČE [26]	48
OBR. 21: DETAIL PULSNÍHO MĚNIČE.....	49
OBR. 22: BLOKOVÉ SCHÉMA STŘÍDAVÉHO POHONU NA STŘÍDAVÉ SÍTI S MOŽNOSTÍ REKUPERACE POMOCÍ PULSNÍHO USMĚRŇOVAČE [18].....	49
OBR. 23: NAPĚTÍ A PROUD PULZNÍHO USMĚRŇOVAČE. PARAMETRY USMĚRŇOVAČE: $U_M=100$ V , $U_D=200 V$, $F_{VZ}=1 kHz$, $F=50 Hz$, $L=0,01 H$ [27].....	50
OBR. 24: FÁZOROVÝ DIAGRAM.....	50
OBR. 25: ZJEDNODUŠENÉ ZAPOJENÍ STŘÍDAVÉHO VOZIDLA S PULSNÍMI USMĚRŇOVAČI [28].....	51
OBR. 26: NÁHRADNÍ SCHÉMA VEDENÍ S PODÉLNOU IMPEDANCÍ A PŘÍČNOU ADMITANCÍ.....	53
OBR. 27: DC OBOUSTRANNÉ NAPÁJENÍ S KONSTANTNÍM PROUDEM, PŘEVZATO Z [30].....	54
OBR. 28: PŘETOK TRANZIENTNÍCH PROUDŮ, PŘEVZATO Z [29].....	55
OBR. 29: PRINCIPIÁLNÍ SCHÉMA NAPÁJENÍ TRATI – AC SYSTÉM, PŘEVZATO Z [29].....	56
OBR. 30: NAPÁJENÍ TV – SCHÉMA TYPU V, PŘEVZATO Z [29].....	58
OBR. 31: SCHÉMA ZAPOJENÍ NAPÁJECÍ STANICE, PŘEVZATO Z [29].....	59
OBR. 32: SCHÉMA FILTRU A AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA LADĚNÉHO FILTRU [23] [26].....	61
OBR. 33: SCHÉMA ZAPOJENÍ KOMPENZACE ÚČINÍKU S FÁZOVÝM REGULÁTOREM [18].....	62
OBR. 34: FÁZOVÝ POSUN PROUDU I_L KU NAPĚTÍ [23].....	62
OBR. 35: FÁZOROVÝ DIAGRAM ZMĚNY PROUDU I_L ZA ÚČELEM DOSAŽENÍ $\cos\phi$ PROUDU I ROVNÝ 1 [18] [23].....	63
OBR. 36: PRINCIPIÁLNÍ SCHÉMA BALANCÉRU, PŘEVZATO Z [31].....	63
OBR. 37: SCHÉMA AKTIVNÍHO BALANCÉRU SITRAB RAB PLUS OD SPOLEČNOSTI SIEMENS, PŘEVZATO Z [32].....	65
OBR. 38: SCHÉMA ZAPOJENÍ AKTIVNÍHO BALANCÉRU K DS V NS, PŘEVZATO Z [32].....	65

OBR. 39: ZÁVISLOST VÝKONU NA TAŽNÉ SÍLE LOKOMOTIVY VECTRON	71
OBR. 40: ZÁVISLOST VÝKONU NA BRZDNÉ SÍLE LOKOMOTIVY VECTRON PRO AC SYSTÉM 15/25 kV	71
OBR. 41: ZÁVISLOST VÝKONU NA BRZDNÉ SÍLE LOKOMOTIVY VECTRON PRO DC. SYSTÉM 3 kV	71
OBR. 42: PRŮBĚH JÍZDY OSOBNÍHO VLAKU S LOKOMOTIVOU VECTRON	72
OBR. 43: PRŮBĚH JÍZDY NÁKLADNÍHO VLAKU S LOKOMOTIVOU VECTRON	72
OBR. 44: PRŮBĚH JÍZDY EXPRESNÍHO VLAKU S LOKOMOTIVOU VECTRON	73
OBR. 45: PRŮBĚH JÍZDY REGIONÁLNÍHO VLAKU DESIRO HC	73
OBR. 46: ZÁVISLOST VÝKONU NA TAŽNÉ SÍLE SOUPRAVY DESIRO HC	74
OBR. 47: ZÁVISLOST VÝKONU NA BRZDNÉ SÍLE SOUPRAVY DESIRO HC	74
OBR. 48: ZÁVISLOST CELKOVÉ BRZDNÉ SÍLY NA ZÁKLADĚ EDB BRZD F_B A JÍZDNÍHO ODPORU $O_{JV_{VLAK}}$ NA RYCHLOSTI.	76
OBR. 49: SROVNÁNÍ JÍZDNÍCH ODPORŮ JEDNOTLIVÝCH SIMULOVANÝCH MODELŮ	77
OBR. 50: POROVNÁNÍ ZREKUPEROVANÉ ENERGIE PŘI BRZDĚNÍ JÍZDNÍ SOUPRAVY	78
OBR. 51: POROVNÁNÍ SPOTŘEBY ENERGIE PRO ROZJEZD JÍZDNÍ SOUPRAVY NA STANOVENOU RYCHLOST	80
OBR. 52: POROVNÁNÍ SPOTŘEBOVANÉ ENERGIE BĚHEM JÍZDY BEZ ZAPOČTENÍ ÚČINNOSTI... ..	81
OBR. 53: ROZDÍL OSOBNÍ VLAK / DESIRO HC A AC/DC SYSTÉM BĚHEM STÁNÍ.....	83
OBR. 54: ROZLOŽENÍ ODPORU AC VEDENÍ [40]	84
OBR. 55: ROZLOŽENÍ ODPORU DC VEDENÍ [40]	84
OBR. 56: POROVNÁNÍ ODBĚRU PROUDU JÍZDNÍCH SOUPRAV Z TV	87
OBR. 57: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ČINNÝCH ZTRÁT NA DC VEDENÍ	89
OBR. 58: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ČINNÝCH ZTRÁT NA AC VEDENÍ	90
OBR. 59: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ REÁLNĚ NAVRÁCENÉ ENERGIE PRO STANOVÉ CYKLY JÍZDNÍCH SOUPRAV	91
OBR. 60: SPOTŘEBOVANÁ ENERGIE VLAKOVÝCH SOUPRAV NA ÚSEKU 50 KM PRO STANOVENÝ CYKLUS	94

Přílohy