

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Symetrizace a kompenzace odběru trakčních napájecích
stanic pro systém 25kV, 50Hz**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Matěj MÍKA**
Osobní číslo: **E16B0030K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Symetrizace a kompenzace odběru trakčních napájecích stanic pro systém 25kV, 50Hz**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Práce bude obsahovat :

1. Popište problémy související s provozem současných TNS (trakčních napájecích stanic), zejména z hlediska kompenzace a symetrizace odběru.
2. Popište klasické řešení TNS pro systém 25 kV, 50Hz v podmínkách ČR a ve světě. Problematika kompenzace a symetrizace odběru (FKZ, V-zapojení, Scottovo zapojení atd.).
3. Popište moderní koncepce symetrizačního zařízení pro TNS a příklady jejich nasazení do praxe.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

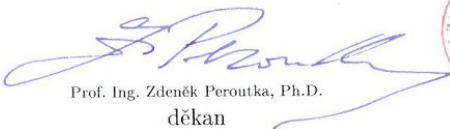
1. Doleček R., Černý O. : "Trakční napájecí soustavy: studijní opora"
Univerzita Pardubice, DFJP, Pardubice 2015.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na problematiku kompenzace jalového výkonu a s tím úzce související problematiku flitrace vyšších harmonických a dále symetrizaci jednofázového odběru z trojfázové sítě v případě trakčních napájecích stanic v systému 25kV, 50 Hz. První část tvoří popis tohoto trakčního systému a analýza jeho energetických dopadů v podobě jalového odběru, deformace a nesymetrické zátěže. V druhé části jsou popsány možnosti minimalizace vlivů nesymetrické zátěže cestou vhodné konfigurace napájecího transformátoru. V třetí části jsou uvedeny možnosti využití řízených polovodičových měničů a pevných impedancí k symetrizaci a kompenzaci odběru. Čtvrtá část pak popisuje aplikace nepřímého frekvenčního měniče k napájení střídavé troleje.

Klíčová slova

trakční napájecí stanice, kompenzace, jalový výkon, vyšší harmonické, symetrizace

Abstract

This thesis deals with problematics of reactive power compensation, and with closely related problematics of harmonics filtration, and further balancing the single-phase load from three-phase grid in case of traction substations in system 25kV, 50 Hz. First part describes this traction system and analyzes its energetic impacts in form of reactive power, deformation and unbalance. Second part notes possibilities of minimizing the effects of unbalanced load using suitable configuration of the transformer. Third part notes possibilities of the use of controlled power convertors and fixed impedances to balancing and compensation. Fourth part describes the applications of indirect frequency convertor in supplying the AC catenary.

Key words

traction substation, compensation, reactive power, harmonics, balancing

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 13.6.2019

Poděkování

Velice děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing Martinu Pittermannovi, Ph.D. za všechny cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah.....	7
Úvod.....	8
Seznam symbolů a zkratek.....	9
Seznam obrázků.....	10
1. TRAKČNÍ SYSTÉM 25kV, 50Hz.....	11
1.1. Historie.....	11
1.2. Využití.....	12
1.3. Charakteristika systému.....	13
1.4. Prvky systému.....	14
1.5. Negativní vlivy na síť	16
1.5.1. Jalový výkon.....	16
1.5.2. Deformační výkon	17
1.5.3. Nesymetrie.....	18
2. SYMETRIZAČNÍ ZAPOJENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	19
2.1. Zapojení do T a do V.....	19
2.2. Scottovo zapojení.....	20
2.3. Ostatní zapojení	21
3. ZAŘÍZENÍ SE SPÍNANÝMI IMPEDANCEMI.....	22
3.1. Statický VAr kompenzátor	23
3.1.1. Konfigurace a funkce.....	24
3.1.2. Aplikace.....	25
3.2. Statický synchronní kompenzátor	28
3.2.1. Konfigurace a funkce.....	29
3.2.2. Aplikace.....	30
3.3. Aktivní balancér	32
3.3.1. Konfigurace a funkce.....	33
3.3.2. Aplikace.....	34
4. NEPŘÍMÝ FREKVENČNÍ MĚNIČ.....	35
4.1. Koncept.....	35
4.2. Aplikace.....	37
5. ZÁVĚR.....	38
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	39

Úvod

Předkládaná práce je koncipována formou rešerše se zaměřením na popis problematiky související s provozem trakčních napájecích stanic v trakčním systému 25kV, 50Hz. Tento trakční systém patří mezi nejvyužívanější na světě a přináší mnoho výhod, které jsou popsány dále v této práci. Přináší ovšem také nevýhody, především v podobě negativních vlivů na energetickou síť, které je nutno potlačovat. Jde především o jalový a deformační výkon, které jsou způsobeny indukčnostmi prvků systému a nelinearitou měniče tvořícího trakční pohon, a dále vznik proudové a napěťové nesymetrie vlivem připojení značné zátěže mezi dvě fáze trojfázové energetické sítě. Oproti dřívějším dobám se v současnosti této problematice věnuje vyšší pozornost a požadavky energetiků na účinník a nesymetrii jsou přísnější, z čehož plyne nutnost vyvíjet systémy které tyto vlivy odstraňují - kompenzují jalový výkon, filtrují vyšší harmonické složky a symetrizují zatížení trojfázové sítě. V této práci jsou popsány používané principy a jejich praktické aplikace, které byly vyvinuty předními světovými firmami v tomto oboru.

Seznam symbolů a zkratk

TNS	Trakční napájecí stanice
TT	Trakční transformovna
SpS	Spínací stanice
HDO	Hromadné dálkové ovládání
FKZ	Filtračně-kompenzační zařízení
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
RAB	Rail active balancer
SFC	Static frequency convertor
RPC	Rail power conditioner
S	Zdánlivý výkon [VA]
S_k	Zkratový výkon sítě [VA]
P	Činný výkon [W]
Q	Jalový výkon [VAr]
D	Deformační výkon [VA]
THD_U	Celkové harmonické zkreslení napětí [%]
THD_I	Celkové harmonické zkreslení proudu [%]
k	Výkonová nesymetrie [%]
$\cos \varphi$	Účinník [-]
Λ	Skutečný účinník [-]
α	Úhel řízení usměrňovače [°] / Střída řídicího signálu střídače [-]

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Lokomotiva V40 navržená Kalmánem Kándem [1].....	11
Obrázek 1.2: Mapa trakčních systémů evropy [24].....	12
Obrázek.1.3: Trakční transformátory z produkce společnosti ABB [25].....	14
Obrázek.1.4: Průřez trolejového vodiče [7].....	15
Obrázek 1.5: Komplexní zobrazení výkonů v elektrickém obvodu[26].....	16
Obrázek 1.6: Nesymetrická zátěž a její fázorový diagram [15].....	18
Obrázek 2.1: Napájení při zapojení do “T” [7].....	19
Obrázek 2.2: Napájení při zapojení do “V” [7].....	19
Obrázek 2.3: Zapojení Scottova transformátoru [10].....	20
Obrázek 2.4: Fázorový diagram Scottova transformátoru [10].....	20
Obrázek 2.5: Další symetrizační zapojení transformátorů [27].....	21
Obrázek 3.1: Steinmetzuv obvod a jeho ekvivalentní obvod.....	22
Obrázek 3.2: Možnosti provedení SVC [17].....	24
Obrázek 3.3: Schéma filtračně - kompenzační stanice [28].....	25
Obrázek 3.4: Regulátor EMADYN [18].....	26
Obrázek 3.5: Proud odebíraný TNS při vypnutém FKZ [19].....	27
Obrázek 3.6: Proud odebíraný TNS při zapnutém FKZ [19].....	27
Obrázek 3.7: Základní schéma STATCOMu [14].....	28
Obrázek 3.8: Schéma STATCOMu s tříhladinovým střídačem [15].....	29
Obrázek 3.9: SVC Light jako součást TNS Evron [5].....	29
Obrázek 3.10: Schéma TNS Evron [5].....	30
Obrázek 3.11: Proud odebíraný zátěží a proudy odebírané ze sítě [5].....	31
Obrázek 3.12: Napěťová nesymetrie [5].....	31
Obrázek 3.13: Moduly realizující řízenou indukčnost a kapacitu [15].....	32
Obrázek 3.14: Principiální schéma aktivního balancéru.....	33
Obrázek 3.15: Schéma RAB [20].....	34
Obrázek 4.1: Přenos výkonu u nepřímého frekvenčního měniče [21].....	35
Obrázek 4.2: Trolej napájená pomocí nepřímého frekvenčního měniče [21].....	35
Obrázek 4.3: Zapojení RPC se Scottovým transformátorem [10].....	36
Obrázek 4.4: Schéma SFC [21].....	37

1. Trakční systém 25kV, 50Hz

1.1. Historie

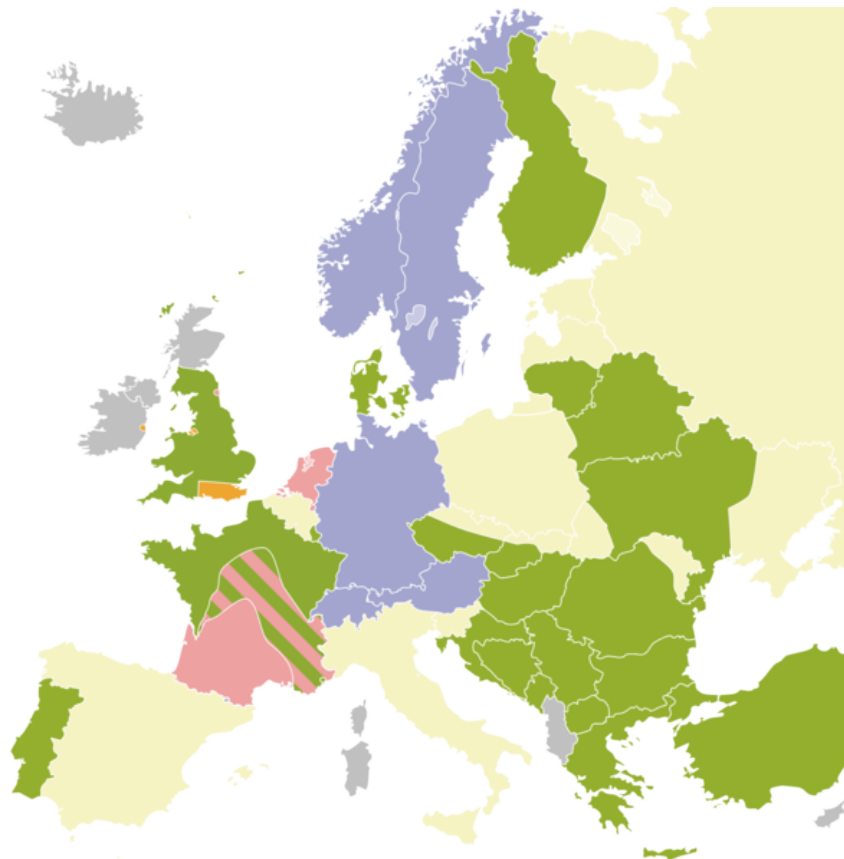
Realizace napájení drážní trakce z veřejné distribuční sítě o technickém kmitočtu 50 Hz, a z toho plynoucí snížení stavebních a provozních nákladů, nebyla po dlouhou dobu možná, z důvodu nevyvinutých typů elektrických lokomotiv pro jednofázový proud daného kmitočtu. Přestože tyto snahy existovaly již dříve (například maďarský inženýr Kálmán Kandó se problematikou lokomotiv na střídavý proud zabýval již kolem roku 1900 [1]), až v padesátých letech minulého století byla ve Francii provedena první velká elektrizaci jednofázovým systémem 25 kV AC, 50 Hz. Vývoj lokomotiv pro jednofázový systém byl tak prudký, že od poloviny padesátých let bylo u všech velkých elektrizací železnic jednoznačně zvoleno řešení jednofázového proudového systému 50 Hz, případně byl zvolen jako druhý systém vedle stávajících stejnosměrných soustav [2].



Obr. 1.1: Lokomotiva V40 navržená Kalmánem Kándem, převzato z [1]

1.2. Využití

V současnosti je tento systém využíván ve Francii, Itálii, Velké Británii, Portugalsku, Finsku, Dánsku, Maďarsku, Rumunsku, Bulharsku, Řecku, zemích bývalé Jugoslávie, Slovensku a v České republice; mimo Evropu pak například v Turecku, Rusku, Indii nebo Austrálii. V některých zemích je provozován s mírně odlišnými parametry (např. USA - 25kV, 60Hz; Japonsko - 20kV, 60Hz) [4].



Obr. 1.2: Mapa trakčních systémů evropy (systém 25kV, 50Hz je vyznačen tmavě zelenou), převzato z [24]

1.3. Charakteristika systému

Charakteristické hodnoty napětí:

Jmenovité napětí U_n [kV]	25
Nejnižší krátkodobé napětí $U_{\min 2}$ [kV]	17,5
Nejnižší trvalé napětí $U_{\min 1}$ [kV]	19
Nejvyšší trvalé napětí $U_{\max 1}$ [kV]	27,5
Nejvyšší krátkodobé napětí $U_{\max 2}$ [kV]	29

Výhody

- možnost použití menších průřezů trolejového vedení (nejčastěji vodiče $100 \text{ mm}^2 + 50 \text{ mm}^2$, oproti $150 \text{ mm}^2 + 120 \text{ mm}^2$ v systému 3 kV DC),
- větší vzdálenost mezi napájecími stanicemi (v rozmezí 40 až 60 km, oproti 20 až 25 km v systému 3 kV DC)
- jednodušší provedení napájecích stanic (TNS tvoří pouze transformátor, v systému 3 kV DC je potřeba usměrňovač)

Nevýhody

- odběr jalového výkonu;
- deformace odebíraného proudu vlivem nelineární zátěže;
- nesymetrické zatížení trojfázové energetické sítě;
- rušení sdělovacích a zabezpečovacích zařízení (například HDO);
- vysoká složitost paralelního chodu trakčních transformoven, proto je většinou využíváno pouze jednostranné napájení úseků trakčního vedení

[2]

1.4. Prvky systému

Napájecí systém v sobě zahrnuje trakční napájecí stanice (TNS) tzv. trakční transformovny (TT), spínací stanice (SpS), distribuční stanice, napájecí a trolejové vedení a též vedení pro zpětný proud. Technické požadavky na tyto prvky stanovuje v ČR norma ČSN 33 3505 ed. 2 [3].

Napájecí stanice

Srdcem trakční transformovny je v podmínkách v ČR zpravidla regulační transformátor $110 \pm 8 \cdot 2 \% / 27$ kV. Hodnota jmenovitého výkonu se obecně pohybuje obvykle mezi 10 a 16 MVA [2], běžná hodnota je 12,5 MVA [4]. Tento transformátor je v základním provedení připojen mezi dvě fáze distribuční sítě velmi vysokého napětí; v ČR výhradně 110 kV, dále například ve Francii 90 kV [5], v Austrálii 132 kV [6] atd... Součástí transformovny jsou dále rozvodna vysokého napětí, rozvodna trakčního napětí, zařízení vlastní spotřeby a kompenzační prvky, které jsou popsány v třetí části této práce.



Obr. 1.3: Trakční transformátory z produkce společnosti ABB, převzato z [25]

Spínací stanice

Spínací stanice jsou využívány za účelem zvýšení spolehlivosti napájení, zvýšení výkonnosti pevných trakčních zařízení a zvýšení propustnosti tratí. Obecně se dělí na vícevypínačové a jednovypínačové. Více vypínačové spínací stanice umožňují:

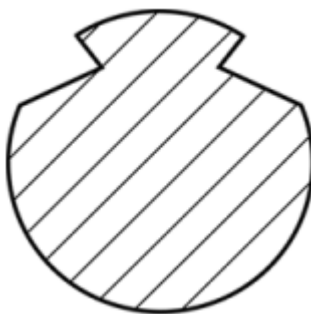
- jednostranné trakčního vedení z přilehlých TNS,
- dvoustranné napájení trakčního vedení při paralelní spolupráci sousedních TNS,
- podélné propojení stop trakčního vedení při výpadku napájení z jedné TNS,
- příčné propojení stop trakčního vedení.

Jednovypínačové stanice umožňují příčné propojení stop trakčního vedení nebo nebo podélné propojení jedné stopy děleného vedení. [3]

Trakční vedení

Trakční vedení se skládá trolejového a zpětného vedení. V praxi se aplikují dva typy trolejového vedení – prosté a řetězkové. Prosté vedení se používá především u vozidel MHD, které nedosahují vysokých rychlostí. Druhý typ - řetězkové vedení, se používá na železnici, kde je trolejový vodič zavěšen na nosném laně, tvořícím řetězovku. Výška trolejového vodiče se nastavuje pomocí laniček.

Trolejový vodič má svůj charakteristický tvar, který vychází z kruhového průřezu vybaveného dvěma postranními výsečemi. (obr.) Postranní výseče trolejového vodiče slouží k upevnění svorek. Trolejový vodič se ve většině případů vyrábí z mědi čisté, nebo doplněné o příměsi stříbra, kadmia či hořčíku. Tyto příměsi slouží ke zvětšení mechanické pevnosti a odolnosti před opotřebením. Průřez trolejového vodiče je nejčastěji 100mm² [7].



Obr. 1.4: Průřez trolejového vodiče, převzato z [7]

Běžné parametry vedení v systému 25kV, 50Hz jsou:

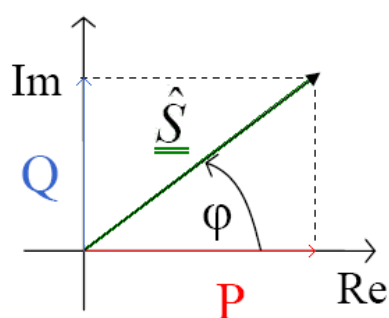
- provozní indukčnost: 1 mH/km
- provozní kapacita: 15-20 nF/km
- provozní svod: 2,7 MΩ/km

[8]

1.5. Negativní vlivy na síť

1.5.1. Jalový výkon

Každý prvek zapojený do střídavého obvodu lze popsat pomocí jeho impedance. Impedance je tvořena činnou a jalovou složkou, přičemž jalová složka může mít induktivní nebo kapacitní charakter. energii vloženou do jalové složky nelze nijak zužítkovat, ale je ji třeba vyrobit a přenést od zdroje ke spotřebiči. To je způsobeno tím, že elektrická energie v jedné části periody v kondenzátoru vytváří elektrostatické pole, respektive v cívice magnetické pole, v druhé části periody pak tato pole zanikají a stejnou energii vracejí do obvodu. Z tohoto důvodu vznikají na daných prvcích ztráty, které jsou v podobě tepla vyzařovány do okolí.



Obr. 1.5: Komplexní zobrazení výkonů v elektrickém obvodu

Veličinou, popisující jaká část zdánlivého výkonu S je v obvodu přeměněna na činný výkon P je účinník, který je roven kosinu fázového posunu mezi proudem a napětím. Platí tedy:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.1)$$

Zdánlivý výkon je tedy vektorový součet činného a jalového výkonu:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.2)$$

Jalový odběr je způsobován indukčností transformátoru v TNS, indukčností vedení a indukčností transformátoru v lokomotivě. Pokud je trakční pohon realizován asynchronním motorem a nepřímým frekvenčním měničem, nemá indukčnost motoru vliv na výsledný účinník, protože je oddělena sejnosemřným meziobvodem měniče. V případě realizace pohonu sejnosemřným motorem a řízeným usměrňovačem stejně tak nemá vliv indukčnost motoru na sejnosemřné straně měniče, ale uplatňuje se vliv usměrňovače, který na střídavé straně způsobuje posun mezi proudem a napětím. Tento posun je roven úhlu řízení usměrňovače α . Hodnoty účinníku jsou tedy závislé na druhu pohonu a režimu jízdy. Pohybují se v rozmezí od 0,6 až do 0,85 indukčních, což je v rozporu s požadavkem provozovatele distribuční soustavy, který činí 0,95 - 1 a je tedy nutné kompenzovat [9] [10].

1.5.2. Deformační výkon

Vztah uvedený výše (1.2) platí pouze v harmonických obvodech. Při použití nelineárních prvků však dochází i při harmonickém napájení k odběru neharmonického proudu. Tento proud obsahuje vyšší harmonické složky, které způsobují nárůst ztrát a z toho plynoucí navýšení zdánlivého výkonu. Pro popis těchto ztrát se zavádí pojem deformační výkon **D**. Výsledný zdánlivý výkon je tedy dán:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.3)$$

V neharmonických obvodech se proto vedle účinníku $\cos \phi$ uvádí také tzv. skutečný účinník, označovaný Λ a definovaný jako:

$$\Lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.4)$$

Pro posouzení obsahu vyšších harmonických složek v celkovém spektru se zavádí celkové harmonické zkreslení, neboli *total harmonic distortion (THD)*. Je definováno jako podíl součtu efektivních hodnot všech vyšších harmonických nad základní harmonickou k efektivní hodnotě základní harmonické. Pro napětí tedy platí:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (1.5)$$

Obdobně pro proud platí:

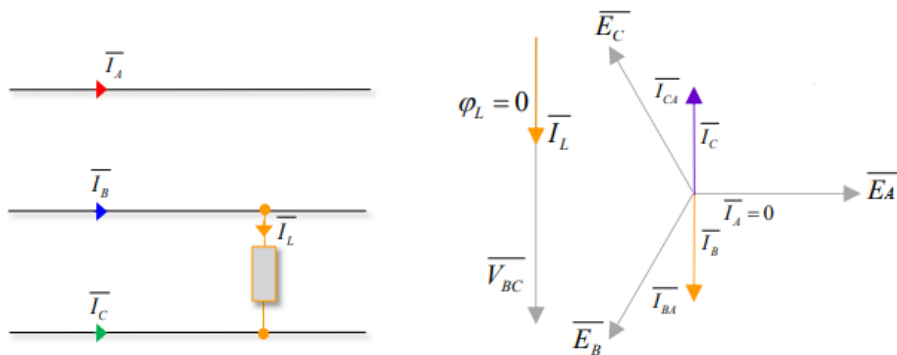
$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (1.6)$$

Budeme-li uvažovat jednofázový usměrňovač v můstkovém zapojení, obsahuje spektrum jeho proudu odebíraného na střídavé straně všechny harmonické lichého řádu. Předpokládáme ideální podmínky, tedy že indukčnost zátěže se blíží nekonečnu, stejně tak zkratový výkon napájecí soustavy a na vstupu usměrňovače je harmonické napětí. Pak bude stejnosměrný proud odebíraný z usměrňovače zcela vyhlazený a proud odebíraný usměrňovačem ze sítě bude mít obdélníkový průběh, pro který platí amplitudový zákon:

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (1.7)$$

Celkové harmonické zkreslení proudu pro obdélníkový průběh je $THD_I = 46\%$. Při aplikaci nepřímého měniče frekvence, který představuje pro síť neřízený můstkový usměrňovač s kapacitní zátěží, se ve spektru odebíraného proudu vyskytují i harmonické sudých řádů, jejich amplituda je však podstatně menší [9] [10].

1.5.3. Nesymetrie



Obr. 1.6: Nesymetrická zátěž a její fázorový diagram, převzato z [15]

Jednofázový odběr narušuje rovnováhu trojfázové sítě. Různý odběr proudu v jednotlivých fázích způsobuje proudovou nesymetrii, která má za následek nestejné úbytky napětí a z toho plynoucí napěťovou nesymetrii. Pro řešení nesymetrických soustav je možné použít metodu souměrných složek, kdy se nesymetrická soustava rozloží na tři soustavy symetrické:

- souslednou,
- zpětnou a
- nulovou.

Sousledná a zpětná složka vytvářejí rotační magnetická pole, nulová složka je pulzující a rotační magnetické pole nevytváří. Sousledná složka má též sled fází jako daná nesymetrická soustava a zpětná složka má opačný sled fází. Nulová složka je tvořena třemi stejnými fázory a vzniká pouze v soustavách s uzemněným uzlem [10].

Stupeň proudové nebo napěťové nesymetrie se stanoví jako poměr nulové složky ku zpětné, v případě připojení zátěže mezi fází a nulový bod, nebo jako poměr zpětné složky ku sousledné, pokud je zátěž připojena mezi dvě fáze. Dále se pro popis nesymetrické zátěže používá výkonová nesymetrie, definovaná jako poměr odebíraného jednofázového výkonu a zkratového výkonu sítě v místě odběru, tedy:

$$k = \frac{S}{S_k} 100 \quad (1.8)$$

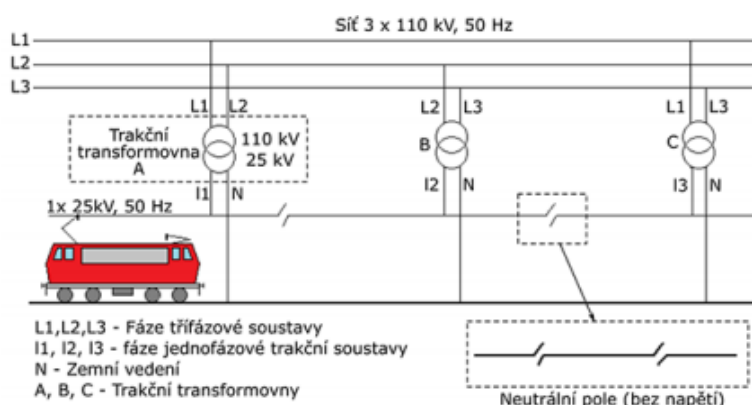
V ČR bývala stanovena maximální přípustná výkonová nesymetrie 2%, v současnosti je to 0,7% [11] [12].

Při nesymetrickém zatížení tečou ve fázích různě velké proudy, což může vést až k nevyužití přenosové kapacity vedení, protože některé fáze může dosahovat teplotního limitu, zatímco ostatních fázích může protékat proud nižší, a tedy i přenesený výkon bude nižší. Připojení asynchronního motoru s kotvou nakrátko k nesymetrickému zdroji napětí má za následek vytvoření zpětného napětí, který vytvoří ve vzduchové mezeře tok otáčející se opačným směrem, než je směr otáčení motoru. To má za následek vznik proudů ve vinutí, které způsobují oteplení a tím pádem zkracují životnost motoru. Moment asynchronního motoru bude při napájení nesymetrickým napětím snížen. Dále dochází k vibracím stroje, což snižuje životnost mechanických částí (např. ložiska) [13].

2. Symetrizační zapojení transformátorů

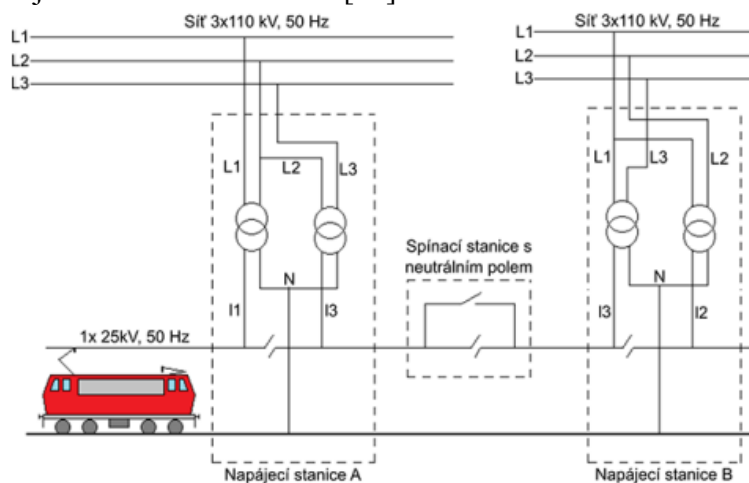
2.1. Zapojení do T a do V

Jak již bylo zmíněno výše, nejjednodušším řešením napájení drážní traktce v systému 25kV, 50Hz je použití jednofázového transformátoru připojeného primárním vinutím mezi dvě fáze sítě velmi vysokého napětí. Toto provedení TT se označuje jako zapojení do “T”. Jedná se o značnou nesymetrickou zátěž, proudová nesymetrie je zde 100%. Za účelem zmírnění tohoto vlivu se provádí cyklické střídání fází, ze kterých je transformátor napojen. To má za následek fázový posun 120° mezi napětími sousedních traťových úseků, mezi nimiž tak vzniká sdružené napětí. Je tedy nutné traťové úseky napájené z různých TNS oddělovat neutrálními poli [7].



Obr. 2.1: Napájení při zapojení do “T”, převzato z [7]

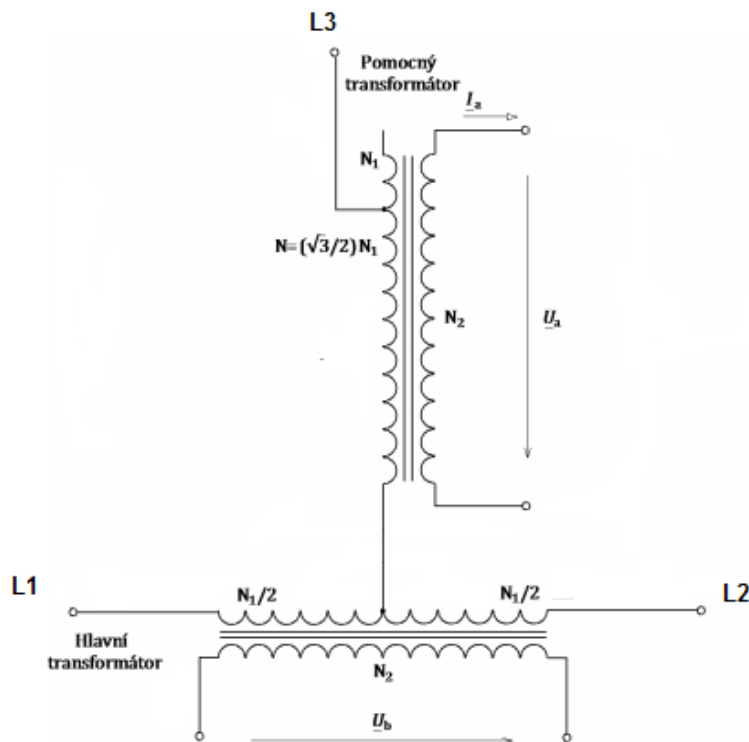
Častější provedení TT, označované jako zapojení do “V”, zahrnuje dva trakční transformátory, zapojené cyklicky k trojfázové síti. Sekundární vinutí umožňují napájet dva úseky trati, které je stejně jako u zapojení do “T” nutné oddělit neutrálním polem. Velikost proudové nesymetrie závisí na velikosti odběrů v traťových úsecích a na účinníku na svorkách TNS. Budeme-li uvažovat přibližně stejný účinník obou úseků, bude se proudová nesymetrie pohybovat mezi 50 % při stejném zatížení transformátorů a 100 % při zatížení pouze jednoho transformátoru [10].



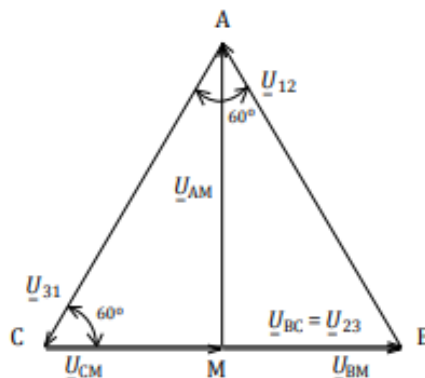
Obr. 2.2: Napájení při zapojení do “V”, převzato z [7]

2.2. Scottovo zapojení

Jako Scottovo zapojení označujeme zapojení dvou transformátorů, hlavního a pomocného, pojmenované po americkém inženýrovi Charlesi Feltonu Scottovi. Toto zapojení převádí trojfázovou soustavu na dvojfázovou, kterou lze použít pro napájení dvou traťových úseků. Jelikož výstupní napětí mají vůči sobě fázový posun 90° , je stejně jako u předchozích zapojení nutné oddělit úseky neutrálními poli. Proudová nesymetrie se pohybuje od 0 %, při stejném zatížení obou napájených úseků, až do 100 % při zatížení pouze jednoho. Toto řešení bývalo aplikováno například ve Francii [10] [11].



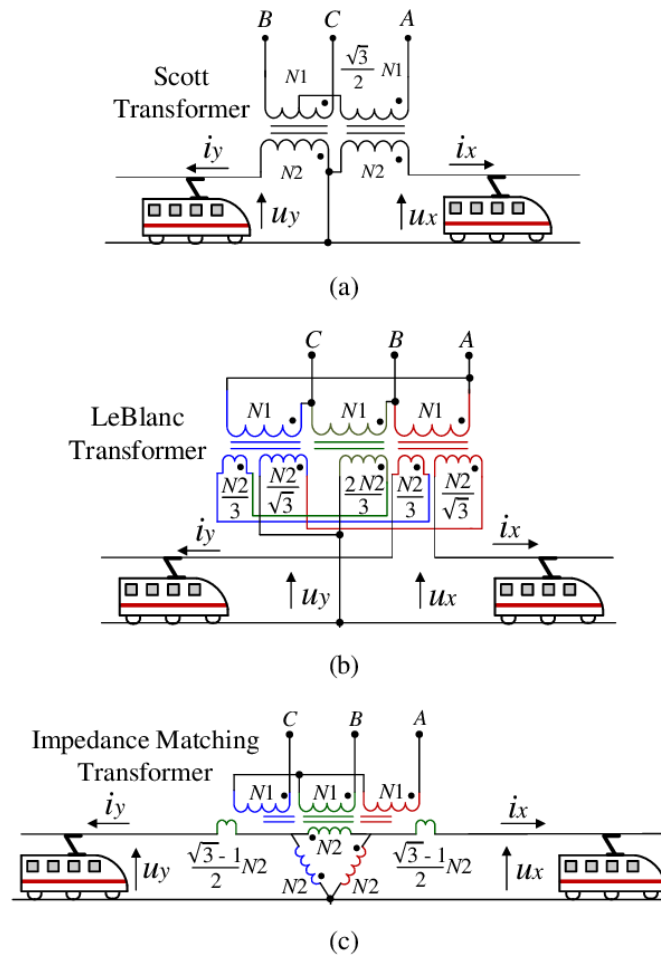
Obr. 2.3: Zapojení Scottova transformátoru, převzato z [10]



Obr. 2.4: Fázorový diagram Scottova transformátoru, převzato z [10]

2.3. Ostatní zapojení

Jiná než výše uvedená zapojení transformátorů nenašla v trakčním systému 25kV, 50Hz významější uplatnění, přesto existují i další možnosti jak pomocí vhodné konfigurace transformátoru symetrizovat odběr dvou napájených úseků z trojfázové sítě. Jde například o LeBlancovo zapojení a jiné modifikace trojfázových transformátorů.



Obr. 2.5: Další symetrizační zapojení transformátorů, převzato z [27]

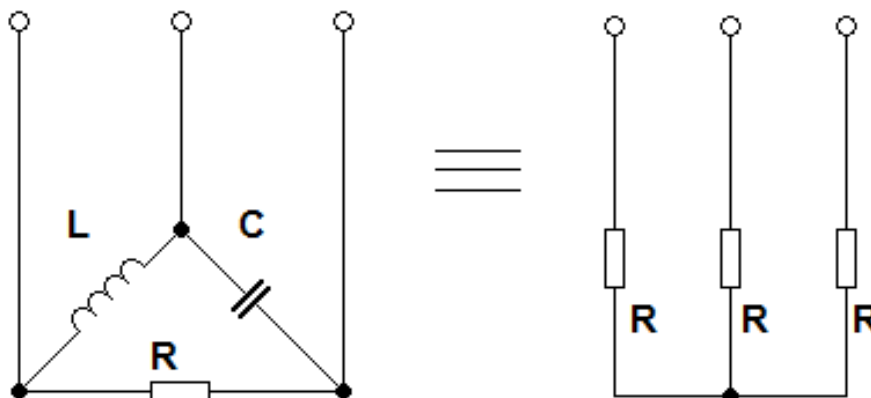
3. Zařízení se spínanými impedancemi

Jako zařízení se spínanými impedancemi označujeme systémy výkonové elektroniky využívající kondenzátory a tlumivky ovládané nejčastěji polovodičovými spínači k řízení toku jalového výkonu. Tato zařízení jsou aplikována za účelem zvýšení přenosové schopnosti vedení a zlepšení říditelnosti a stability přenosové soustavy. Používá se též označení FACTS, z anglického *flexible alternating current transmission system* [14]. V této práci se zaměřím na typy těchto zařízení, které nacházejí uplatnění v trakčním systému 25kV, 50Hz, a to Statický VAr kompenzátor (SVC), Statický synchronní kompenzátor (STATCOM) a Aktivní balancér.

Jak již bylo uvedeno výše, zařízení se spínanými impedancemi umožňují řízení toku jalového výkonu a tedy kompenzaci na přirozený účinník $\cos \varphi = 0,95$ indukčních. Dále je možné symetrizovat jednofázový odběr pomocí principu Steinmetzova zapojení. Steinmetzovo zapojení, pojmenované po významném německém matematikovi a inženýrovi Karlu Steinmetzovi se skládá z rezistoru, kondenzátoru a cívky spojených do trojúhelníka. Pokud je splněno:

$$X_L = X_C = \sqrt{3}R \quad (3.1)$$

chová se celé zapojení z hlediska sítě jako tři rezistory R zapojené do hvězdy, tedy jako symetrická činná zátěž o stejném výkonu, jako rezistor R zapojený mezi dvě fáze [15].



Obr. 3.1: Steinmetzuv obvod a jeho ekvivalentní obvod

3.1. Statický VAR kompenzátor

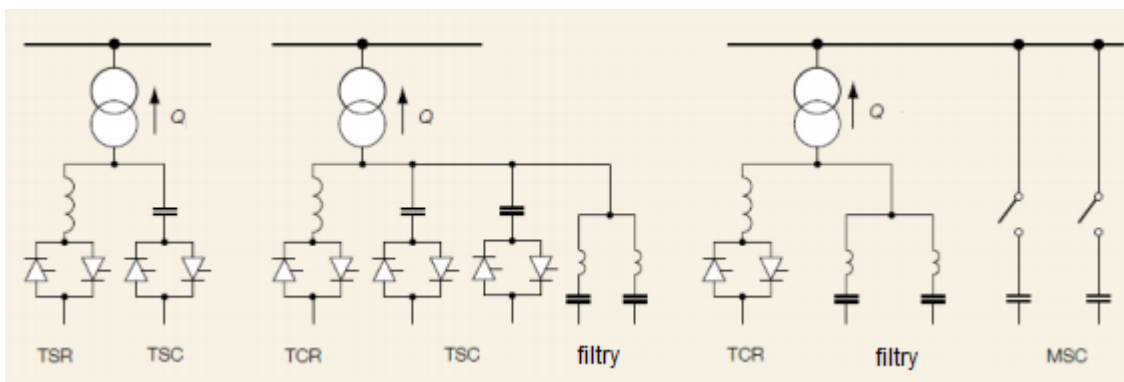
Statické kompenzátory označované jako SVC patří mezi nejpoužívanější zařízení FACTS. Nahradily rotační kompenzátory využívající princip synchronního stroje. Využívají tyristorové řízení a vyznačují se rychlou odezvou a flexibilní regulací. V průběhu let bylo vyrobeno velké množství a druhů těchto zařízení, nicméně většina z nich je sestavena z kombinací těchto prvků:

- Tyristorově řízená tlumivka (Thyristor-controlled Reactor - TCR)
- Tyristorově spínané tlumivky (Thyristor-switched Reactor - TSR)
- Tyristorově spínané kondenzátory (Thyristor-switched Capacitor - TSC)
- Mechanicky spínané kondenzátory (Mechanically switched capacitor – MSC)

V případě TCR a TSR se jedná o vzduchovou tlumivku sériově připojenou k obousměrné tyristorové propusti. Rozdíl mezi tyristorem řízenou a tyristorem spínanou tlumivkou je ve fázovém řízení kmitočtu, kde TSR, na rozdíl od TCR, nemá žádné vyšší harmonické proudy. Tyristorově spínané kondenzátory TSC jsou také sériově připojeny k obousměrné tyristorové propusti. Funkce tyristorového přepínače je zde pouze k připojení nebo odpojení kondenzátoru. Frekvenci a amplitudu proudu zde můžeme ladit právě kondenzátorem TSC. Mechanicky spínané kondenzátory MSC se skládají z laděné větve obsahující kapacitní a indukční jednotku [14] [16].

3.1.1. Konfigurace a funkce

V systému SVC můžeme použít několik konfigurací kombinujících základní prvky zmíněné výše a rezonanční filtry pro eliminaci vyšších harmonických kmitočtů. Na obrázku (2.1) je zobrazeno několik možností [17]. Nejčastější konfigurací aplikovanou v systému 25kV, 50Hz je TCR doplněná o zpravidla dva rezonanční filtry (3. a 5. harmonická), které eliminují dané nežádoucí složky, a zároveň se pro 1. harmonickou jeví jako impedance kapacitního charakteru, která kompenzuje, respektive překompenzuje indukční jalový odběr; výsledného přirozeného účinníku se dosáhne regulací dekompenzačního členu, tedy tlumivky.

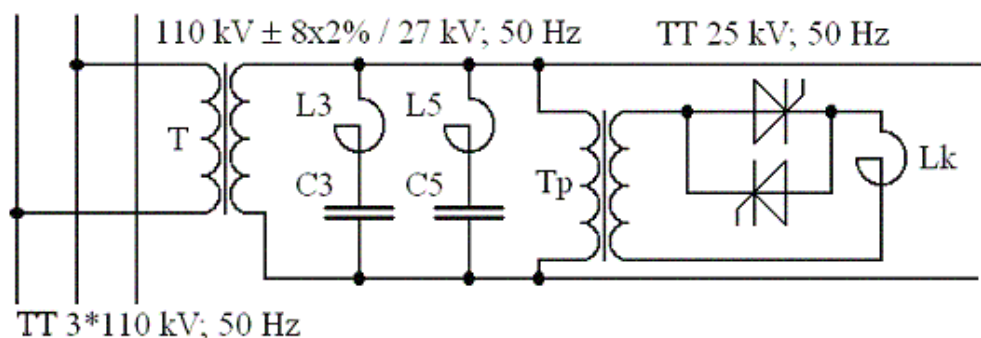


Obr. 3.2: Možnosti provedení SVC, převzato z [17]

3.1.2. Aplikace

ČKD: Filtračně - kompenzační zařízení

FKZ, vyráběné a dodávané společností ČKD ELEKTROTECHNIKA, a.s. je v ČR nejrozšířenější provedení SVC a je standardní součástí TNS 25kV, 50Hz. Skládá se z tyristorově řízené tlumivky (TCR) a několika filtrů vyšších harmonických, tvořených seriovým spojením kondenzátoru a tlumivky. Běžná FKZ mají filtry naladěny na 3. a 5. harmonickou s prostorovou rezervou pro 7. harmonickou, která v ČR nebývá využita [18].



Obr. 3.3: Schéma filtračně - kompenzační stanice, převzato z [28]

Použité prvky

- Tlumivky

Filtrační tlumivky, používané v FKZ jsou koncipovány jako vzduchové. Tlumivky s magnetickým obvodem se u těchto zařízení nepoužívají z důvodu vyšších ztrát a závislosti indukčnosti na velikosti proudu. Dekompenzační tlumivky mohou být vzduchové, obdobné konstrukce jako filtrační, nebo olejové se železným jádrem.

- Kondenzátory

FKZ využívá kondenzátorové baterie doplněné o balanční ochrany. Kondenzátory obsahují ekologicky nezávadné a obtížně zápalné dielektrikum.

- Tyristorový měnič

Výkonová část měniče je tvořena jednou nebo několika měničovými sestavami typu COMPACT, případně VARIANT. Použitím pastilkových polovodičových prvků přímo spínaných optickým signálem (optotyristory) a vzduchového chlazení na principu tepelných trubec se docílí značná kompaktnost prvkových bloků a tím i snížení objemu celých měničů. Současné parametry těchto optotyristorů umožňují konstruovat měniče na plné napětí soustavy 25 kV, bez potřeby snižovacího transformátoru.

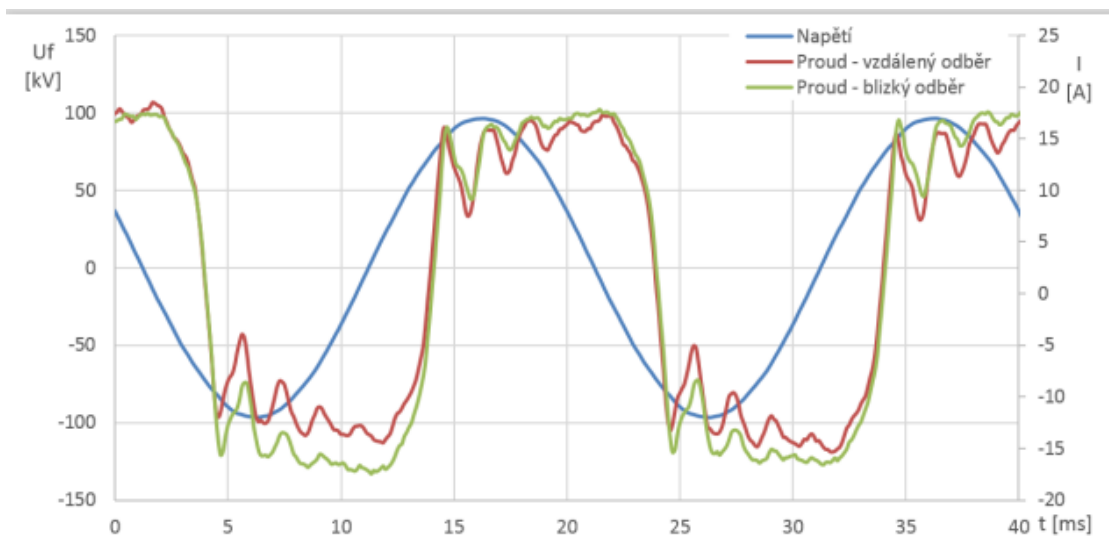
- Regulační systém EMADYN

EMADYN je regulační systém na bázi mikroprocesoru řady INTEL[®] 196. Výsledná sestava regulátoru závisí na konkrétní aplikaci, avšak základní procesorová jednotka je jednotná. Je založena na mikroprocesoru INTEL 80C196 KČ a obsahuje 3 sériové kanály, paměti typu RAM, EPROM a EEPROM, řadič dvouportové paměti a zdroj napájecího napětí. Regulační software pracuje standardně s šestnáctibitovými operandy. Jeho základem je systém nezávislých regulačních bloků, které umožňují stavebnicově sestavovat regulační bloková schémata dle požadavku pro danou aplikaci. Patří sem například: blok generátoru řídicích impulsů pro tyristory, blok regulátoru proudu, blok obecného regulátoru PID, blok filtru, blok komparátoru s hysterezí, apod. Tyto bloky jsou naprogramovány tak, aby byla dosažena maximální výpočtová rychlost a tím i odezva na regulační zásah. V řídicím programu jsou jednotlivé bloky vhodně propojeny tak, aby realizovaly požadované regulační smyčky [18].

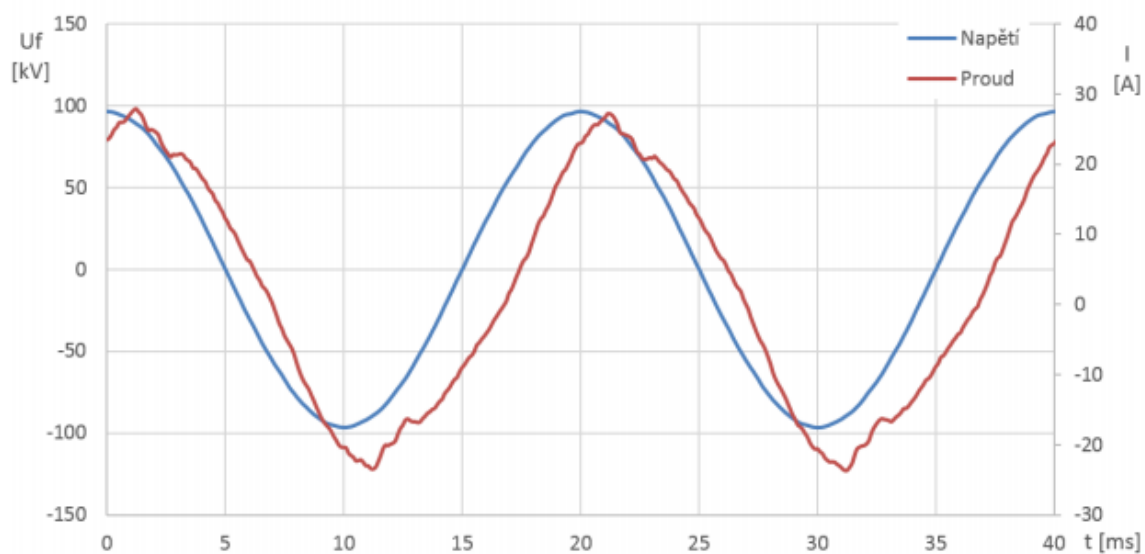


Obr. 3.4: Regulátor EMADYN, převzato z [18]

Charakteristiky



Obr. 3.5: Proud odebíraný TNS při vypnutém FKZ, převzato z [19]



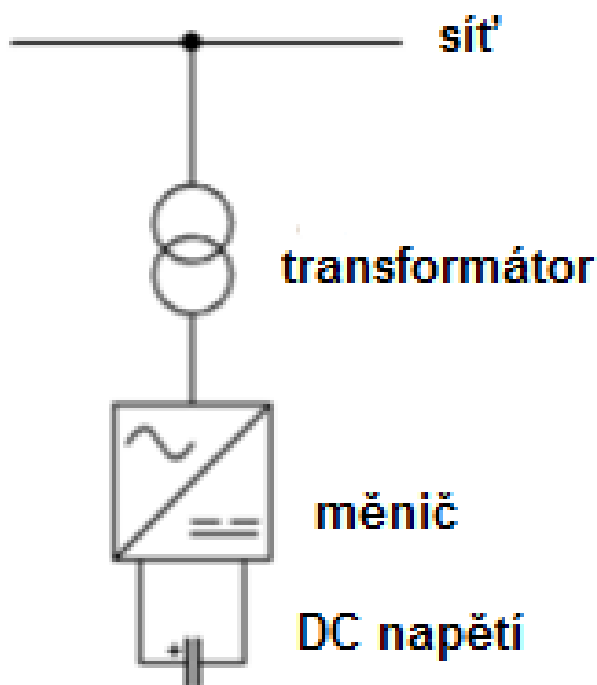
Obr. 3.6: Proud odebíraný TNS při zapnutém FKZ, převzato z [19]

3.2. Statický synchronní kompenzátor

3.2.1. Funkce a konfigurace

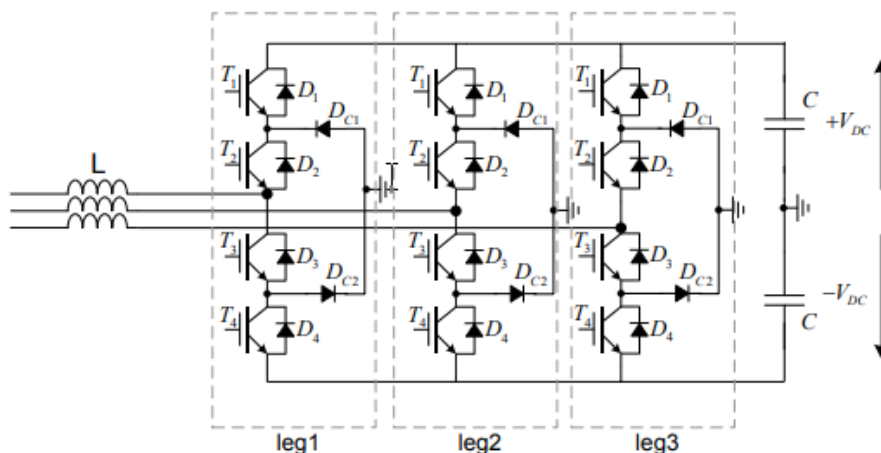
Statický synchronní kompenzátor označovaný zkratkou STATCOM, má oproti SVC rychlejší časovou odezvu (méně než 10 ms) a lepší provozní charakteristiky; díky tomu dokáže efektivně kompenzovat v reálném čase. Hlavní konstrukční rozdíl oproti kompenzátorům SVC, využívajícím zpravidla tyristorové spínače je využití IGBT tranzistorů [14] [17].

Statický kompenzátor typu STATCOM může do sítě dodávat či z ní odebírat jalový výkon. Velikost dodávaného, případně odebíraného výkonu závisí na velikosti amplitudy napětí z měniče a velikosti amplitudy napětí soustavy. Pokud je amplituda napětí měniče větší než napětí soustavy, zařízení dodává do systému jalový výkon; pokud by byla amplituda napětí soustavy větší než měniče, je jalový výkon ze systému odebírán [14].



Obr. 3.7: Základní schéma STATCOMu, převzato z [14]

V základní konfiguraci se STATCOM skládá ze stejnosměrného zdroje, který může být nahrazen stejnosměrným kondenzátorem, trojfázového střídavého měniče napětí a transformátoru. Filtry zde nejsou potřeba z důvodu nízkých hodnot vyšších harmonických. Jako měnič napětí je využit tříhladinový střídač složený standardně z 12 IGBT tranzistorů (namísto dříve požívaných vypínatelných tyristorů - GTO), 12 zpětných diod, umožňujících usměrňovací chod v případě, že je jalový výkon ze soustavy vrácen zpět do zdroje, a 6 upínacích diod. Řízení výstupního napětí střídače, a tím i dodávaného či odebíraného jalového výkonu, je prováděno pomocí pulzní šířkové modulace [14].



Obr. 3.8: Schéma STATCOMu s tříhladinovým střídačem, převzato z [15]

3.2.2. Aplikace

SVC Light

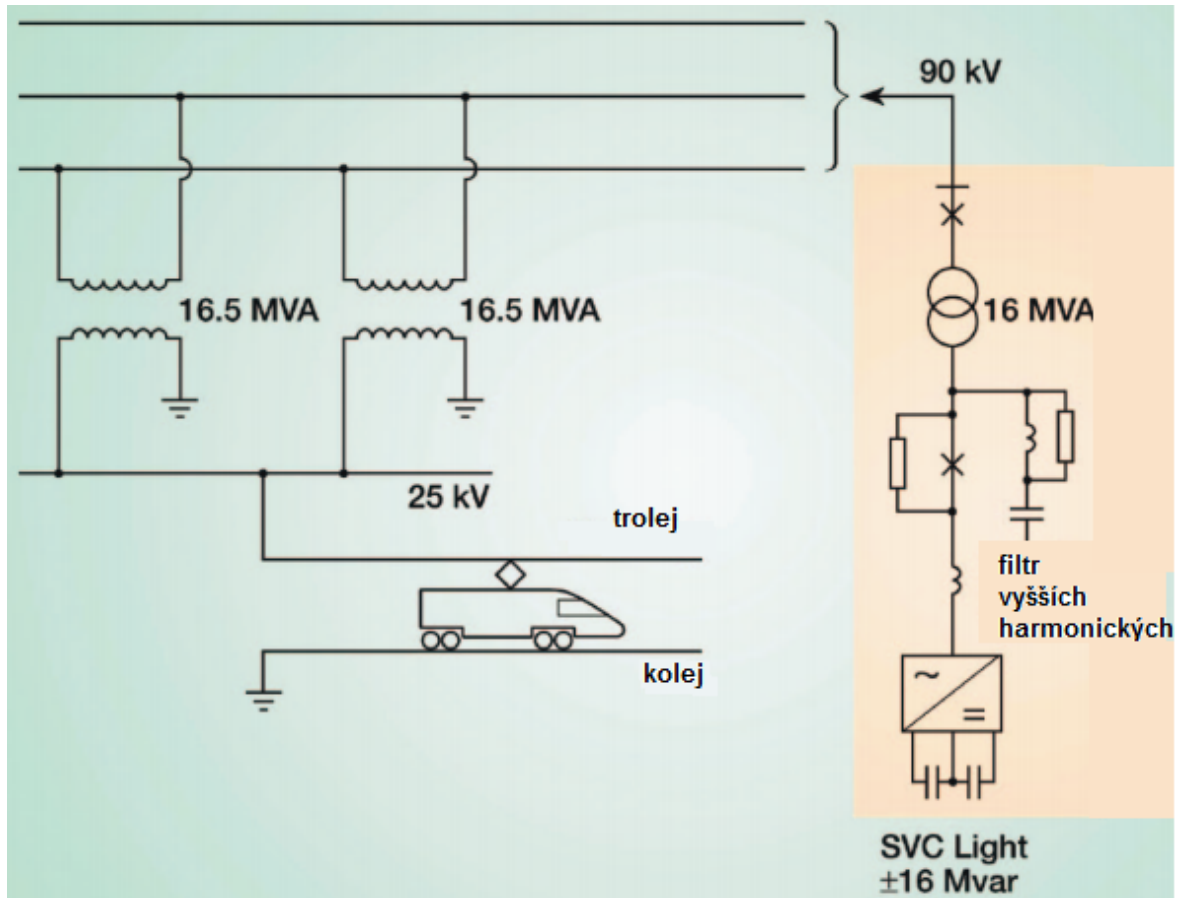
Přestože je tento výrobek společnosti ABB dodáván pod obchodním názvem SVC Light, jedná se principiálně o STATCOM. Je aplikován například v napájecí stanici EVRON ve Francii na trati Paříž - Rennes. Tato stanice o jmenovitém výkonu 17 MVA je napájena ze sítě vn 90 kV o zkratovém výkonu cca 700 MVA [15]. Systém je připojen k síti 90 kV pomocí snížovacího transformátoru, jehož sekundární vinutí je přes vzduchové tlumivky připojeno na střídavou stranu tříhladinového střídače. Dále je na sekundární vinutí připojen filtr pro filtraci vyšších harmonických vytvářených střídačem [5].



Obr. 3.9: SVC Light jako součást TNS Evron, převzato z [5]

Funkce

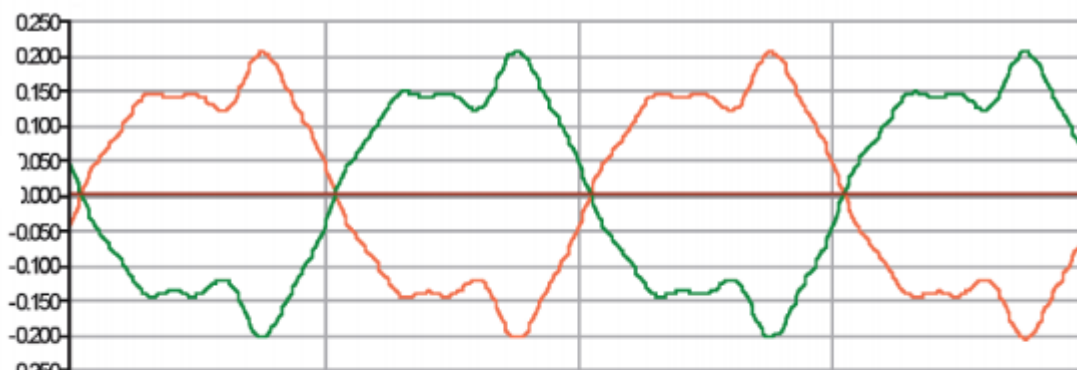
SVC Light umožňuje dodávat, respektive odebírat jalový výkon v rozsahu od 16 MVar kapacitních do 16 MVar indukčních. Řízení je prováděno pomocí PWM. Vedle kompenzace jalového výkonu a symetrizace jednofázového zatížení trojfázové sítě umožňuje toto zařízení také aktivní filtraci vyšších harmonických kmitočtů. Princip aktivní filtrace je založen na generování proudu o stejné velikosti a frekvenci, který je k původnímu proudu v protifázi. Účinnost aktivní filtrace a řád nejvyšší harmonické, kterou lze fitrovat závisí na spínací frekvenci střídače. V případě stanice EVRON je filtrace efektivní až do 9. harmonické včetně [5].



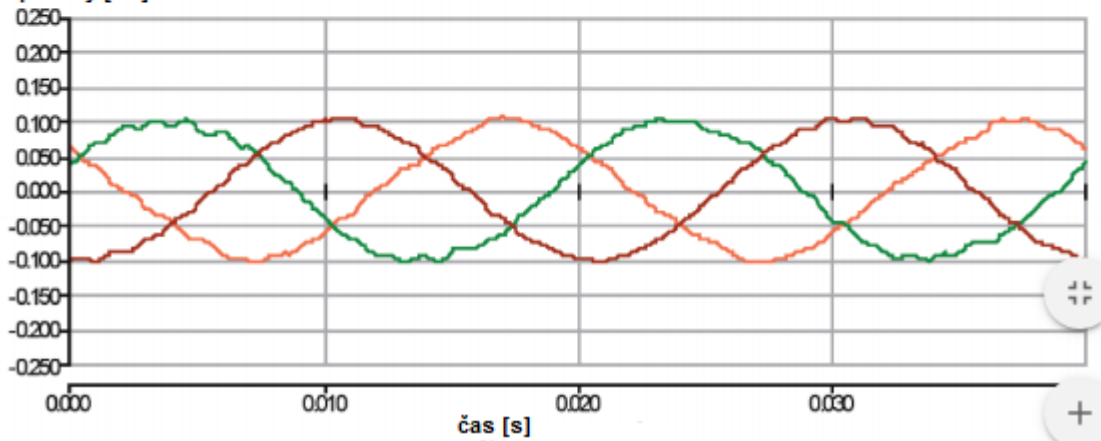
Obr. 3.10: Schéma TNS Evron, převzato z [5]

Charakteristiky

proud zátěží [kA]

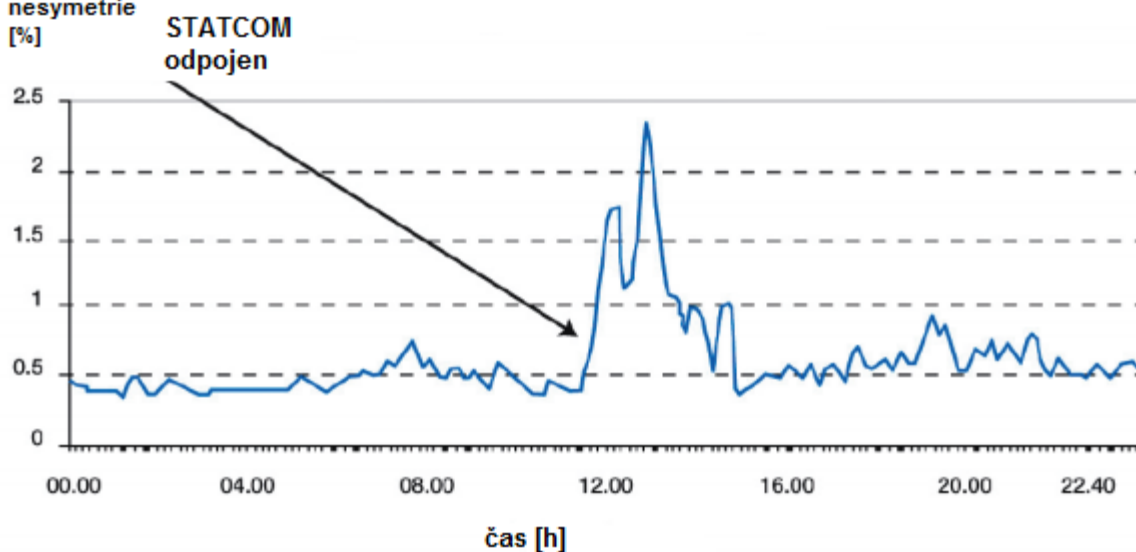


síťové proudy [kA]



Obr. 3.11: Proud odebíraný zátěží (nahore) a proudy odebírané ze sítě (dole), převzato z [5]

napěťová
nesymetrie
[%]



Obr. 3.12: Napěťová nesymetrie, převzato z [5]

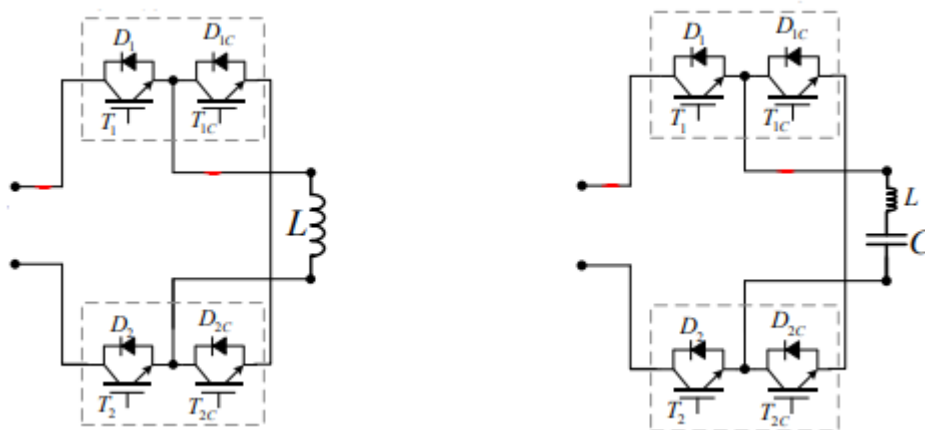
3.3. Aktivní balancér

Aktivní balancéry využívají k realizaci řízené kapacitní nebo indukční reaktance jednofázové střídavé měniče napětí, v anglofonní literatuře označované jako *AC choppers*. Tyto měniče pracují obdobně jako autotransformátor, tedy umožňují regulovat výstupní napětí od nuly do hodnoty vstupního napětí. Řízení se provádí pomocí PWM. V případě, že je na výstup měniče připojena impedance, lze stejně řídit jeho vstupní impedanci. To umožňuje konstrukci modulů představujících proměnnou reaktanci, jejíž velikost je úměrná střídě signálu PWM označované α . [15] Pro indukčnost tak platí:

$$Z = \frac{\omega L}{\alpha^2} \quad (3.2)$$

a obdobně pro kapacitu:

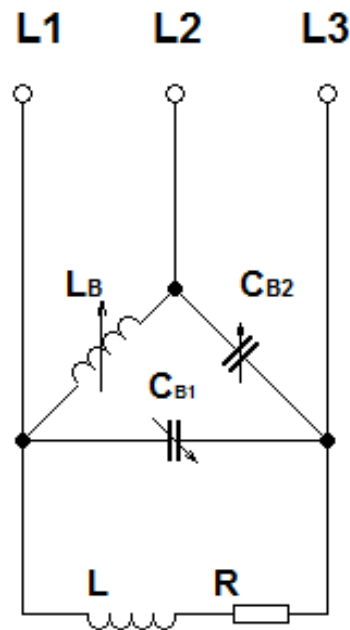
$$Z = \frac{1}{\omega C \alpha^2} \quad (3.3)$$



Obr. 3.13: Moduly realizující řízenou indukčnost (vlevo) a kapacitu (vpravo), převzato z [15]

3.3.1. Funkce a konfigurace

Aktivní balancér je v základní konfiguraci tvořen dvěma moduly realizujícími řízenou kapacitu C_{B1} a C_{B2} , a jedním modulem realizujícím řízenou indukčnost L_B . Tyto moduly jsou zapojeny do trojúhelníka a připojeny k trojfázové síti. Zátěž, tvořená činnou složkou R a indukční složkou L , je připojena paralelně k větvi kapacitního modulu C_{B1} . Tento kapacitní modul slouží ke kompenzaci indukční jalové zátěže. Činná složka zátěže, společně s kapacitou C_{B2} a indukčností L_B tvoří Steinmeztův obvod, který činnou zátěž symetricky rozkládá do tří fází napájení [6] [15].

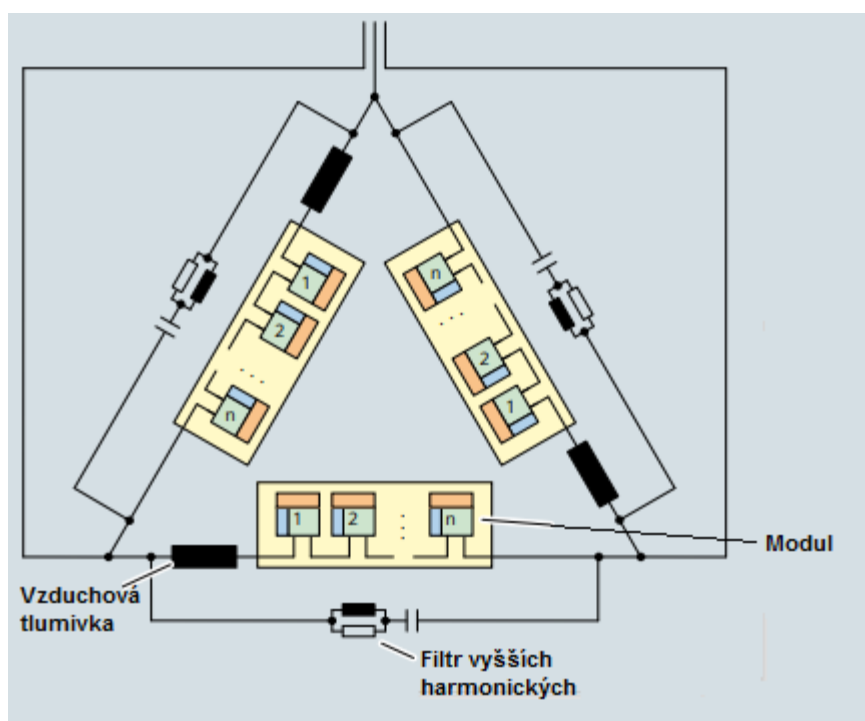


Obr. 3.14: Principiální schéma aktivního balancéru

3.3.2. Aplikace

Sitras : RAB plus (Rail Active Balancer)

Rail Active Balancer, tedy drážní aktivní balancér je systém vyvinutý společností Siemens pro symetrizaci jednofázové zátěže v systému 25kV, 50Hz. Je tvořen třemi vícehladinovými měniči, zapojenými do trojúhelníka, z nichž každý je tvořen sériově spojenými výkonovými moduly. Každá větev je doplněna o sériovou tlumivku a paralelní filtr pro omezení vyšších harmonických. Balancér může být připojen k síti vysokého napětí pomocí snížovacího transformátoru, nebo k systému 25 kV pomocí vazebních tlumivek. K řízení systému je využíván hardware a software WinCC and Simatic TDC [20].



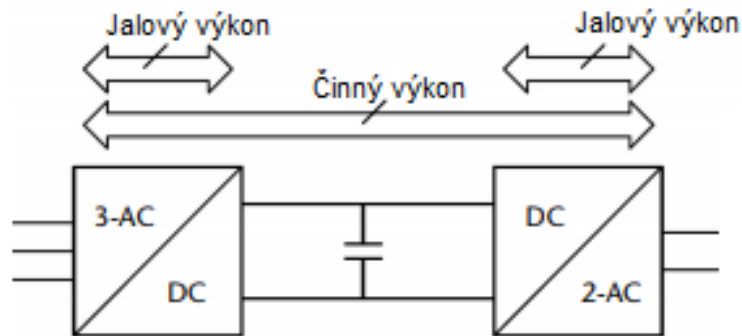
Obr. 3.15: Schéma RAB, převzato z [20]

4. Nepřímý frekvenční měnič

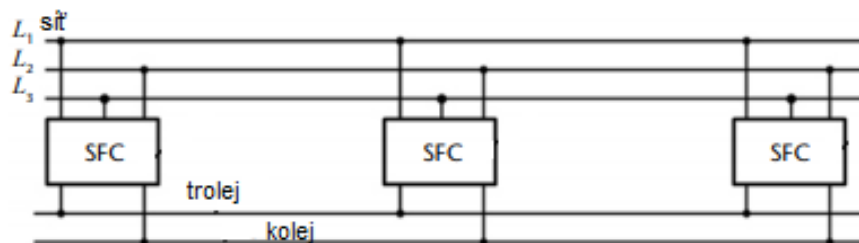
4.1. Koncept

Nepřímý frekvenční měnič (případně statický frekvenční měnič, angl. *static frequency convertor* - SFC) tvořený usměrňovačem, stejnosměrným meziobvodem a střídačem patří mezi nejpoužívanější elektrické pohony aplikované k regulaci otáček střídavých strojů [9]. Tento koncept lze využít i pro trakční napájení. Neřízený usměrňovač nezpůsobuje žádný fázový posun a tedy žádný jalový odběr a v případě šestipulzního provedení je zatížení sítě zcela symetrické. Výstupní střídač umožňuje napájet trolej libovolným kmitočtem, ať již technickým (50/60 Hz) nebo sníženým (16,7 Hz).

Další výhodou je možnost napájení traťového úseku z více TNS bez nutnosti použití neutrálních polí nebo složitého paralelního chodu transformátorů. Pokud jsou střídače synchronizovány, není mezi výstupy jednotlivých TNS fázový posuv, tedy žádné napětí a neprotékají žádné vyrovnávací proudy [21].

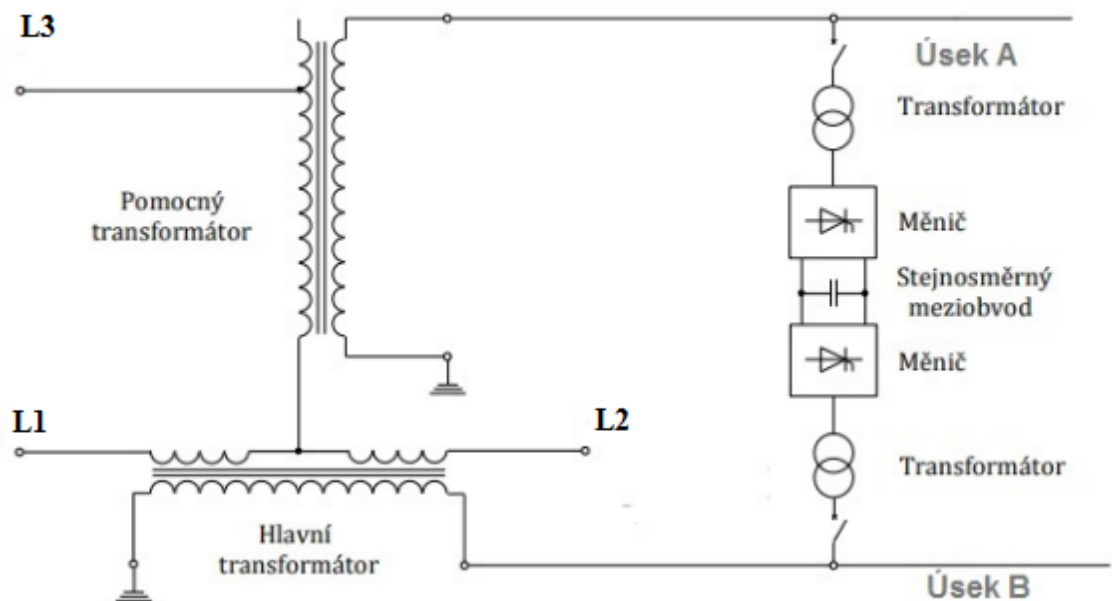


Obr. 4.1: Přenos výkonu u nepřímého frekvenčního měniče, převzato z [21]



Obr. 4.2: Trolej napájená pomocí nepřímého frekvenčního měniče, převzato z [21]

Další možností aplikace nepřímého frekvenčního měniče je zařízení označované jako Rail Power Conditioner (RPC), které ve spojení se Scottovým transformátorem zajišťuje zcela symetrické zatížení sítě. Zařízení RPC se skládá ze dvou stejných transformátorů a dvou měničů propojených vzájemně stejnosměrným obvodem. Měniče pracují podle směru toku energie jako usměrňovače nebo střídače. Dojde-li k rozdílu činných výkonů mezi oběma napájenými úseky trati, RPC zajistí tok výkonu z více zatíženého úseku do méně zatíženého, Scottův transformátor tak bude na obou sekundárních vinutích zatížen stejně a bude tedy trojfázovou síť zatěžovat symetricky [10]. Toto zařízení je aplikováno například v TNS Japonských vysokorychlostních tratí [22].

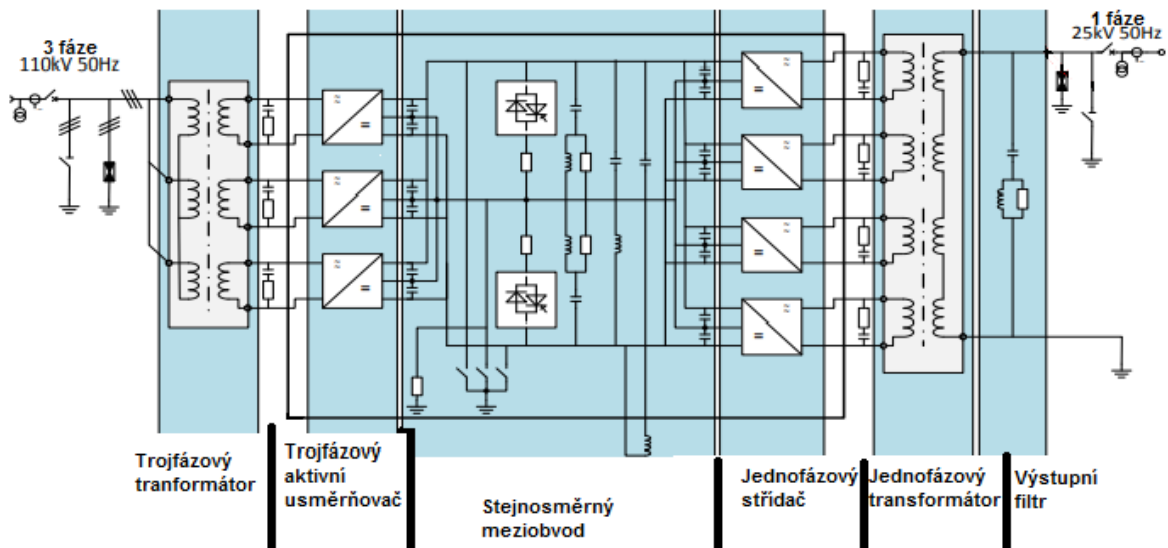


Obr. 4.3: Zapojení RPC se Scottovým transformátorem, převzato z [10]

4.2. Aplikace

ABB: SFC

Tento výrobek společnosti ABB již nachází uplatnění na mnoha místech jak v Evropě, tak mimo ni, kupříkladu v Austrálii na trati Brisbane – Rosewood. Takováto TNS zatěžuje síť zcela symetricky, odebírá pouze činný výkon a má nízkou emisi harmonických [21].



Obr. 4.4: Schéma SFC, převzato z [21]

5. Závěr

Díky svým výhodám, popsaným v první části práce, je systém 25kV, 50Hz jeden z nejvyužívanějších trakčních systémů a i proto Centrální komise ministerstva dopravy v prosinci 2016 schválila studii s názvem „Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014–2020 a naplnění požadavků TSI ENE“, podle které dojde využití tohoto systému i na tratích dosud napájených stejnosměrným napětím 3 kV [23]. Z širokého využití systému vyplývá i tempo vývoje systémů potlačujících negativní působení prvků tohoto systému, zejména z energetického hlediska. Na trhu, kterému v tomto oboru dominují společnosti Siemens a ABB, jsou v současnosti k dispozici různá řešení těchto vlivů, z nichž ty nejvyužívanější jsou popsány v druhé, třetí a čtvrté části této práce. V podmínkách v ČR je v současnosti běžné provedení TNS zahrnující dva transformátory v zapojení do “V”, které napájejí dva úseky trati, z nichž každý je vybaven FKZ. Moderních provedení zahrnují statické kompenzátory, aktivní balancéry využívající řízené polovodiče a pevné impedance k regulaci toku jakolvého výkonu a dále nepřímé frekvenční měniče SFC, které byly vyvinuty primárně pro systém využívající sníženou frekvenci a zajišťují zcela symetrický činný odběr, mají nízkou produkci harmonických, a umožňují v případě synchronizovaného řízení výstupních střídačů bezproblémový paralelní chod více stanic. Díky zcela symetrickému odběru tak umožňují napájení i ze sítě vysokého napětí (např. 22kV), která by vlivem svého nižšího zkratového výkonu nebyla vhodná k připojení nesymetrické zátěže.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Kálmán Kandó* [online]. Wikipedia, 2015 [cit. 16.3.2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1lm%C3%A1n_Kand%C3%B3
- [2] ZLÁMAL, Marek. *Rozbor technických řešení napájení drážní trakce 25kV AC*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [3] ČSN 33 3505. *Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Základní požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [4] DOLEČEK, Radovan a ČERNÝ, Ondřej. *Trakční napájecí soustavy*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-880-0
- [5] *SVC Light® for railway load balancing* [online]. ABB, 2015 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/a8eb7d4c84157390c12578780040b3e1/A02-0203%20E_.pdf
- [6] *Multiple SVC installations for traction load balancing in Central Queensland* [online]. ABB, 2015 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/9d4eec9d07475dd1c1256fda003b4cfc/A02-0134E_Multiple%20SVC_LR.pdf
- [7] *Pevná trakční zařízení pro vozidla závislé trakce* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2005 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015050204>
- [8] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-769-8
- [9] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005. ISBN 978-80-7043-422-8
- [10] FUKALA, Bogdan. *Analýza vlivů nesymetrické a nelineární zátěže na energetickou napájecí soustavu*. Ostrava, 2014. Disertační práce. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky
- [11] FEJT, Jiří. *Pevná trakční zařízení*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1966.
- [12] *Střídavá trakční soustava* [online]. K-REPORT, 2006 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: <https://www.k-report.net/clanky/stahovacky-prezitek-nebo-nutnost/?kapitola=1>
- [13] ŠACH, Jaroslav. *Model nesymetrické zátěže*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [14] PTÁČEK, Ondřej. *Řízení toku výkonu v síti*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [15] RAIMONDO, Giuliano. *Power quality improvements in 25kV 50 Hz railway substation based on chopper controlled impedances*. Toulouse, 2012. Doktorská práce. Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [16] *Způsoby řízení výkonových toků v přenosových soustavách*. [online]. oEnergetice, 2015 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/zpusoby-rizeni-vykonovych-tokuv-prenosovych-soustavach/>

- [17] *FACTS - Powerful systems for flexible power transmission* [online]. ABB, 1999 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/33cd/a93c2892b74961fe0ffa101a1cfa88175d1.pdf>
- [18] *Filtračně-kompenzační zařízení* [online]. ČKD ELEKTROTECHNIKA, a.s., 2012 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: http://www.ckde.cz/kiwi_files/CKDE/002_filtracne_-_kompenzacni_zarizeni.pdf
- [19] LAKOMÝ, Marek. *Analýza provozu trakční napájecí stanice*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [20] *Sitras RAB plus* [online]. Siemens, 2018 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: https://www.downloads.siemens.com/download-center/download?DLA14_85
- [21] *Static Frequency Converter* [online]. ABB, 2017 [cit. 18.4.2019]. Dostupné z: http://www.irgreenri.gov.in/pdf/Presentations%20%20at%20Railway's%20International%20Conference%202017/Session%205/2.%20Arunav%20Kumar%20Jha_SFC%20Presentation_ABB.pdf
- [22] *Practical Application of the Railway Static Power Conditioner (RPC) for Conventional Railways* [online]. Meiden, 2012 [cit. 20.02.2019]. Dostupné z: http://shiwa-suidou.meidensha.co.jp/rd/rd_02/rd_02_02/rd_02_02_01/rd_02_02_01_01/_icsFiles/afieldfile/2015/03/02/article-201203-0038.pdf
- [23] *Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu na české železniční síti* [online]. MDČR, 2017 [cit. 2.03.2019]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n>
- [24] *Železniční napájecí soustava* [online]. Wikipedie, 2004 [cit. 16.2.2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_nap%C3%A1jec%C3%AD_soustava
- [25] *Special transformers Railway* [online]. ABB, 2012 [cit. 18.3.2019]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/f1200714de5086c585257d7300287357/1LF12026%20special%20power%20transformers%20for%20railway%20-%20brochure%20EN.pdf>
- [26] *Elektrický výkon* [online]. Wikipedie, 2005 [cit. 16.2.2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_v%C3%BDkon
- [27] *Power quality phenomena in electrified railways: Conventional and new trends in power quality improvement toward public power systems* [online]. ResearchGate, 2018 [cit. 16.2.2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/325495136_Power_quality_phenomena_in_electrified_railways_Conventional_and_new_trends_in_power_quality_improvement_toward_public_power_systems
- [28] *Filtračně kompenzační stanice* [online]. Wikipedie, 2008 [cit. 16.2.2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Filtra%C4%8Dn%C4%9B_kompenza%C4%8Dn%C3%AD_stanice