

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
*KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ*

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Odolnost el. pohonu z hlediska poklesu napájecího napětí**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Radek TESÁREK  
Osobní číslo: E13N0135P  
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika  
Název tématu: Odolnost el. pohonu z hlediska poklesu napájecího napětí  
Zadávací katedra: Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

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

1. Proveďte stručný popis negativních vlivů na napájená zařízení (především krátkodobé poklesy napětí, nesymetrie, neharmonické průběhy v napájecí síti atd.).
2. Popište mechanismus negativního působení na základní typy pohonů (tj. asynchronní motor a synchronní motor připojený přímo k síti, asynchronní motor napájený z měniče a stejnosměrný motor napájený z tyristorového usměrňovače).
3. Uveďte příklady opatření umožňující zvýšit odolnost pohonu vůči těmto negativním vlivům.
4. Pro konkrétní příklad proveďte kvantitativní porovnání odolnosti pohonu vůči těmto vlivům (výsledky měření resp. simulace).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce se zabývá zkoumáním odolnosti elektrického pohonu na poklesy napájecího napětí. Rozdělena je do pěti kapitol. První kapitola definuje co je to pokles napětí a jaké jsou možnosti jeho vzniku a šíření v napájecí soustavě. Druhá kapitola je věnována dalším poruchám sítě jako například nesymetrie, neharmonické, flickr a možnosti jejich omezení. Ve třetí kapitole je popsáno jakým negativním způsobem poklesy napětí působí na vybrané typy elektrických pohonů. Možnostem zvýšení odolnosti pohonů vůči poklesům napětí pomocí různých prostředků se zabývá kapitola čtvrtá. Poslední, pátá kapitola je praktické měření odolnosti asynchronního motoru napájeného měničem kmitočtu, který je vybaven zvyšovacím pulzním měničem pro redukování účinků poklesu napětí. V této kapitole jsou porovnány případy, kdy je pohon naprázdno a při zatížení, a dále také je-li při těchto provozních stavech použit pulzní měnič k vyrovnání napětí.

## **Klíčová slova**

Elektrický pohon, pokles napětí, nesymetrie, zvýšení odolnosti pohonu, asynchronní motor, měnič kmitočtu, zvyšovací pulzní měnič, zdroj energie, stejnosměrný meziobvod, napětí na kondenzátoru

## **Annotation**

Presented diploma thesis investigates the immunity of the electric drive to voltage sag. Thesis is divided into five chapters. First chapter defines what is a voltage sag, how it could be created and how it spreads in power system. Second chapter is devoted to another disorders of network of such as asymmetry, non-harmonic, flicker and possibilities of their restrictions. Third chapter describes, how the voltage sag could affect selected types of electric drive. Under chapter four, the possibilities of increasing immunity of drive towards voltage sag with using different devices is addressed. The final, fifth chapter is a practical measurement of immunity of induction motor powered by frequency converter. In this case, frequency converter is equipped by a pulse set-up converter to reduce the effects of voltage sag. This chapter compares the cases, when the electric drive is without a load and under a load, and whether a set-up pulse converter is used or not.

## **Key words**

Electric drive, voltage sag, voltage asymmetry, increasing of the immunity of electric drive, asynchronous motor, frequency converter, set-up pulse inverter, the power source, the DC-link, voltage on the capacitor

## **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: 7.5.2015

Bc. Radek Tesárek

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Martinovi Pittermannovi, Ph.D za cenné rady při konzultacích a měření a dále Ing. Jiřímu Fořotvi, Ph.D za spolupráci při měření.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1. VZNIK POKLESU NAPĚTÍ .....</b>	<b>13</b>
1.1. DEFINICE POKLESU NAPĚTÍ .....	13
1.1.1. <i>Krátkodobý pokles napětí .....</i>	<i>13</i>
1.1.2. <i>Přerušeni napájecího napětí.....</i>	<i>13</i>
1.2. PŘÍČINY VZNIKU POKLESU NAPĚTÍ .....	14
1.2.1. <i>Příčiny poklesu napětí způsobené poruchami v rozvodné síti.....</i>	<i>14</i>
1.2.2. <i>Šíření poklesů napětí .....</i>	<i>16</i>
1.2.3. <i>Poklesy napětí způsobené odběrateli elektrické energie .....</i>	<i>17</i>
1.2.4. <i>Poklesy/přerušeni napětí vzniklé odskokem sběrače od trakčního vedení .....</i>	<i>19</i>
<b>2. NESYMETRIE, NEHARMONICKÉ, FLIKR A JEJICH VLIV NA POHON .....</b>	<b>20</b>
2.1. NESYMETRIE .....	20
2.1.1. <i>Zdroje nesymetrie .....</i>	<i>21</i>
2.2. NEHARMONICKÉ PRŮBĚHY .....	22
2.2.1. <i>Fourierova řada .....</i>	<i>22</i>
2.3. FLIKR .....	23
2.3.1. <i>Vznik flikru.....</i>	<i>24</i>
2.3.2. <i>Účinky flikru .....</i>	<i>24</i>
2.3.3. <i>Omezení flikru .....</i>	<i>25</i>
<b>3. NEGATIVNÍ PŮSOBENÍ POKLESU NAPĚTÍ NA VYBRANÉ TYPY POHONŮ .....</b>	<b>27</b>
3.1. ASYNCHRONNÍ MOTOR PŘIPOJENÝ PŘÍMO K SÍTI .....	27
3.1.1. <i>Moment asynchronního motoru.....</i>	<i>28</i>
3.2. SYNCHRONNÍ MOTOR PŘÍMO PŘIPOJENÝ K SÍTI.....	30
3.2.1. <i>Moment synchronního motoru.....</i>	<i>31</i>
3.2.2. <i>Rozběh synchronního motoru .....</i>	<i>32</i>
3.2.3. <i>Vypadnutí ze synchronismu .....</i>	<i>32</i>
3.3. ASYNCHRONNÍ MOTOR NAPÁJENÝ Z MĚNIČE KMITOČTU.....	33
3.3.1. <i>Vstupní usměrňovače měniče kmitočtu.....</i>	<i>35</i>

3.3.2. Stejnoseměrný meziobvod měniče kmitočtu .....	36
3.3.3. Napěťový střídač.....	37
3.4. STEJNOSMĚRNÝ MOTOR NAPÁJENÝ Z TYRISTOROVÉHO USMĚRŇOVAČE .....	38
3.4.1. Působení poklesů napětí na pohony se stejnosměrnými motory .....	40
<b>4. OPATŘENÍ ZVYŠUJÍCÍ ODOLNOST EL. POHONŮ VŮČI POKLESŮM A PŘERUŠENÍ NAPĚTÍ.....</b>	<b>41</b>
4.1. PROSTŘEDKY AKUMULUJÍCÍ ENERGII .....	41
4.1.1. Akumulátorové baterie .....	41
4.1.2. Zdroje nepřerušovaného napájení UPS .....	41
4.1.3. Setrvačníky .....	44
4.1.4. Superkondenzátory .....	45
4.1.5. Supravodivé magnetické systémy .....	46
4.1.6. Energie ze stlačeného vzduchu.....	46
4.2. ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI POHONU POMOCÍ POLOVODIČOVÝCH PRVKŮ .....	47
4.2.1. DVR - dynamický napěťový regulátor .....	47
4.2.2. Zvýšení odolnosti pomocí napěťových pulzních usměrňovačů.....	48
4.2.3. Zvýšení odolnosti použitím pulzního měniče v meziobvodu .....	49
4.3. ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI POHONŮ POMOCÍ ŘÍZENÍ STŘÍDAČE .....	49
<b>5. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ ODOLNOSTI ELEKTRICKÉHO POHONU. 52</b>	<b>52</b>
5.1. SLOŽENÍ POHONU .....	52
5.2. ZVYŠOVACÍ PULZNÍ MĚNIČ PRO ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI POHONU .....	52
5.3. SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	53
5.4. MĚŘENÍ .....	54
5.4.1. Měření naprázdno bez regulace .....	54
5.4.2 Měření naprázdno s regulací na požadovanou hodnotu $U_{pož} = 195V$ .....	56
5.4.2 Měření naprázdno s regulací na požadovanou hodnotu $U_{pož} = 200V$ .....	58
5.4.4. Měření při zatížení 800W bez regulace .....	60
5.4.5. Měření při zatížení 1200W bez regulace .....	62
5.4.6. Měření při zatížení 800W s regulací na $U_{pož} = 195V$ .....	64
5.4.7. Měření při zatížení 1280W s regulací na $U_{pož} = 195V$ .....	66
5.4.8. Měření při zatížení 1280W s regulací na $U_{pož} = 200V$ .....	68
5.5. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....	71
5.6. POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	72



<b>6. ZÁVĚR.....</b>	<b>73</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>75</b>

## Seznam symbolů a zkratk

$U_c$	.....	dohodnuté jmenovité napětí
OZ	.....	opětovné zapínání
$S_k$	.....	zkratový výkon
$X_k$	.....	reaktance vn soustavy
$u_k$	.....	napětí nakrátko transformátoru
$X_t$	.....	reaktance transformátoru
$\Delta U_{dyn}$	.....	dynamická změna napětí
$\alpha$	.....	řídící úhel usměrňovače
$d_{kom}$	.....	relativní hloubka komutačního poklesu
$X_{kv}$	.....	reaktance sítě v přípojném bodě
$X_{kom}$	.....	součet reaktancí mezi přípojným bodem a usměrňovačem
$L_{kom}$	.....	indukčnost komutační tlumivky
$f$	.....	kmitočet sítě
$u_{kom}$	.....	relativní napětí nakrátko komutační tlumivky
$S_{sStr}$	.....	výkon usměrňovače
$\rho_u$	.....	činitel nesymetrie
$S_L$	.....	zdánlivý výkon zátěže
$S_K$	.....	zkratový výkon napájecího obvodu
$a_0$	.....	Fourierův koeficient pro stejnosměrnou složku
$a_n$	.....	Fourierův koeficient pro sudou složku
$b_n$	.....	Fourierův koeficient pro lichou složku
$h$	.....	řád harmonické
$Q$	.....	jalový výkon zátěže
$S_{kz}$	.....	zkratový výkon v místě připojení zátěže
STATCOM	.....	statické kompenzátory
TCR	.....	kompenzátor s tyristory řízeným reaktorem
FC	.....	kompenzátor s pevnými kompenzátory
$M$	.....	moment motoru
$m$	.....	počet fází
$\omega$	.....	úhlová rychlost
$s$	.....	skluz
$X_k$	.....	podélná reaktance motoru
$M_{max}$	.....	maximální moment motoru
$M_{záb}$	.....	záběrný moment motoru

$\omega_s$ .....	synchronní rychlost točivého pole
$\beta$ .....	zátěžný úhel synchronního motoru
$U_{ib}$ .....	budící napětí
$X_d$ .....	podélná reaktance
$I_k$ .....	proud nakrátko
$C_{ss}$ .....	hodnota kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu
$U_d$ .....	napětí v meziobvodu
GTO.....	hradlem vypínaný tyristor
IGCT.....	tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou
IGBT.....	bipolární tranzistor s řízeným hradlem
$u_a$ .....	napětí kotvy stejnosměrného motoru
$i_a$ .....	proud kotvy stejnosměrného motoru
$k$ .....	koeficient stejnosměrného motoru
$\phi$ .....	magnetický tok stejnosměrného motoru
$U_{dAV}$ .....	výstupní napětí z tyristorového usměrňovače
$I_{dAV}$ .....	výstupní proud z tyristorového usměrňovače
UPS.....	systemy nepřerušovaného napětí
LSFW.....	nízkorychlostní setrvačníky
HSFW.....	vysokorychlostní setrvačníky
DVR.....	dynamický napěťový regulátor
$I_{sd}$ .....	momentotvorná složka proudu
$I_{sq}$ .....	tokotvorná složka proudu
$U_c$ .....	napětí na kondenzátoru v meziobvodu
$I_{mot}$ .....	proud v asynchronním motoru
$U_d$ .....	napětí v meziobvodu před zvyšovacím pulzním měničem
$I_1, I_2, I_3$ .....	proudy vstupující do usměrňovače
$I_d$ .....	proud ve stejnosměrném meziobvodu
$U_{pož}$ .....	požadovaná hodnota napětí na kondenzátoru při regulaci
$U_{idyn}$ .....	indukované napětí dynama
$I_{dyn}$ .....	zatěžovací proud dynama

## Úvod

V dnešní době, kdy jsou v elektrizační soustavě připojeny různé nelineární spotřebiče, především různá elektronická zařízení, která odebírají proud s různým zkreslením a obsahem harmonických, je potřeba věnovat pozornost poruchám sítě. Mezi tyto poruchy patří nesymetrie, flickr, vyšší obsah harmonických a v neposlední řadě poklesy napětí. Poklesy napětí mohou vznikat i atmosférickými poruchami. Elektrické pohony, které patří k důležitým spotřebičům v energetické síti, jsou těmito poruchami sítě také ovlivňovány. Pohony jsou ale také zdrojem poruch, především generování harmonických. Tato práce je však věnována omezení těchto vlivů ze strany sítě, ne naopak. V nejrůznějších průmyslových aplikacích, ale také v pohonech elektrické trakce, je důležité dbát na to, aby při poklesech napětí nebyl ohrožen provoz, na kterém jsou závislé technologické postupy výroby, bezpečnost provozu či dokonce lidské životy. Je žádoucí, aby pohon zachoval při snížení napájecího napětí svůj výkon, rychlost nebo alespoň aby v nejhorším případě došlo k vypnutí měniče, ale nedošlo k jeho zničení. Pro zachování těchto parametrů jsou využívány různé způsoby a zařízení, kterými lze odolnost pohonu zvýšit či dokonce zcela eliminovat. V některých případech lze pohon udržet v požadovaném stavu i při úplném výpadku napájení. Mezi nejrozšířenější pohony dnes patří asynchronní motor napájený napětovým měničem kmitočtu. Proto je také tomuto typu pohonu věnováno celé praktické měření a větší část teoretická.

## 1. Vznik poklesu napětí

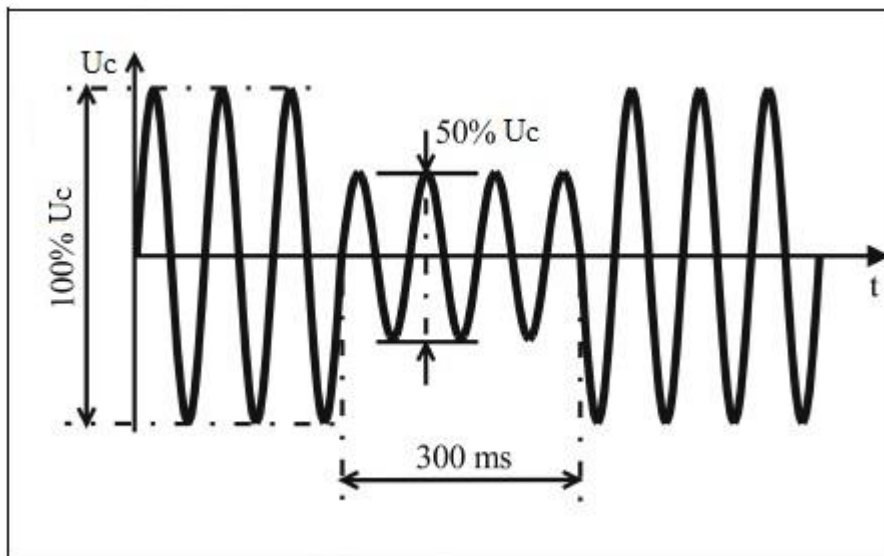
Pokles napětí vzniká několika způsoby, které budou obsahem této kapitoly. Z hlediska doby trvání je lze rozdělit na poklesy krátkodobé a dlouhodobé.

### 1.1. Definice poklesu napětí

Pokles napětí definuje norma ČSN EN 50160 – Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. V této normě se pokles napětí vztahuje k dohodnutému napájecímu napětí  $U_c$ . Za toto napětí  $U_c$  je obvykle bráno napětí jmenovité  $U_n$ . Pouze v některých případech to může být napětí jiné, ale na tomto se musí dohodnout dodavatel i odběratel elektrické energie.

#### 1.1.1. Krátkodobý pokles napětí

Krátkodobým poklesem napětí rozumíme náhlý pokles napájecího napětí, který se pohybuje v rozmezí 90%  $U_c$  a 5%  $U_c$ . Po tomto poklesu následuje obnovení napětí v relativně krátkém časovém intervalu. Konvenční doba tohoto časového intervalu je od 10ms do 1 minuty. Neklesne-li hodnota napětí pod 90%  $U_c$ , pak toto nepovažujeme za krátkodobý pokles napětí.



Obr. 1.1: Pokles napájecího napětí na 50%  $U_c$  s dobou trvání 300ms [28]

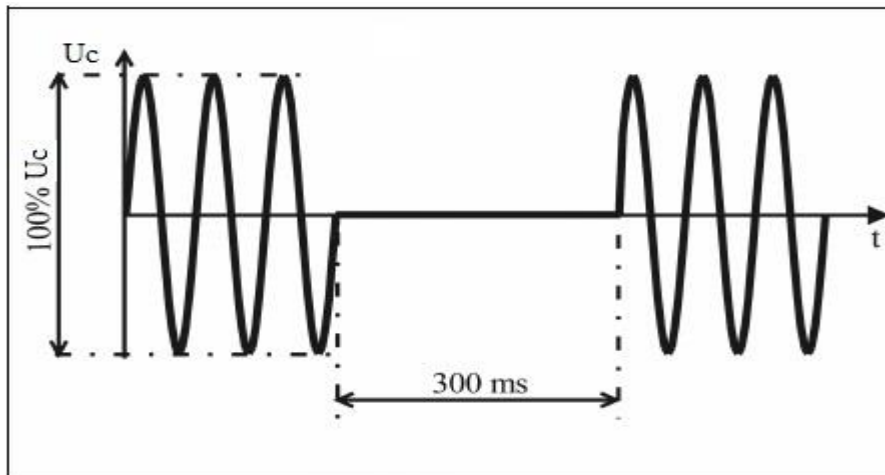
#### 1.1.2. Přerušování napájecího napětí

V tomto stavu klesne napětí v předávajícím bodě soustavy pod 5%  $U_c$ . Přerušování napětí lze dále dělit na:

- **předem dohodnutá**, o těchto přerušováních jsou odběratelé předem informováni a mohou tyto účinky vhodnými opatřeními minimalizovat.

- **poruchová**, způsobená trvalými nebo přechodnými poruchami většinou spojenými s vnějšími vlivy, poruchami zařízení nebo rušením. Poruchová přerušení ještě můžeme rozdělit na:

- dlouhodobá přerušení, trvající déle než 3 minuty, která jsou způsobena trvalou poruchou
- krátkodobá přerušení, trvající do 3 minut, která jsou způsobena přechodnou poruchou [1]



Obr. 1.2: Přerušení napájecího napětí s dobou trvání 300ms [28]

## 1.2. Příčiny vzniku poklesu napětí

Jako hlavní příčiny poklesu napětí mohou být poruchy v rozvodné síti nebo příčiny způsobené odběrateli. Specifický původ poklesu napětí může nastat v oblasti elektrické trakce, kde je za tuto příčinu zodpovědný odskok sběrače od trolejového vedení.

### 1.2.1. Příčiny poklesu napětí způsobené poruchami v rozvodné síti

Původ těchto poklesů lze rozdělit na externí a interní. Externí příčiny jsou většinou náhodné a nezávislé na stavu distribuční soustavy. Interní příčiny jsou spjaty například s ukončením životnosti zařízení, jež je součástí distribuční sítě.

#### Externí příčiny poruch:

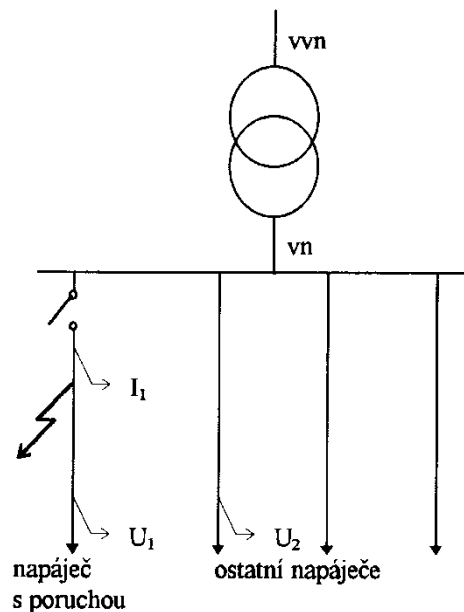
- atmosférické jevy: bouřka, blesk, mlha, sníh, mráz. Tyto jevy většinou ovlivňují venkovní vedení;
- náhodné příčiny: dotyk s cizími částmi (např. větve stromů, ptáci). Dále dopravní nehody, při kterých dojde ke kolizi s vedením elektrizační soustavy. Narušení izolace kabelů při výkopových pracích nebo jiné manipulace;
- přenos poruchy ze síťového systému nadřazeného nebo podřazeného (distribuční soustava vn může ovlivnit distribuční soustavu nn i naopak).

**Interní příčiny poruch:**

- průraz izolace zařízení tj. izolátory vedení, kabely, transformátory, vypínače. Napětí, které způsobí průraz, není větší, než napětí, na které je projektována izolační pevnost zařízení;
- chybná funkce ochran;
- chybná manipulace obsluhy distribuční sítě. [1]

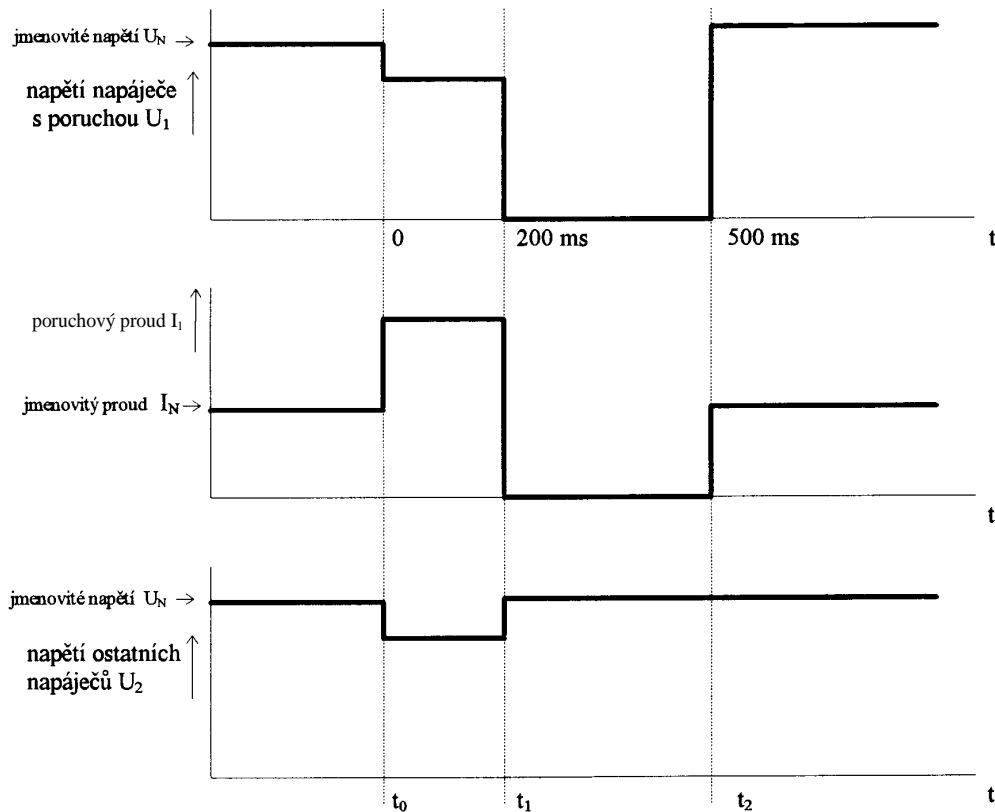
**Opětovné zapínání (OZ)**

Na vedení vznikají poruchy např. zemní spojení nebo zkraty. Tyto poruchy jsou eliminovány nadproudovými ochranami, které jsou doplněny automatikou opětovného zapínání (OZ). Automatika OZ má za funkci ochranu venkovních vedení proti škodám vznikající přeskoky na izolátorech. Po zásahu nadproudové ochrany, tj. vypnutí zkratu a zhašení oblouku, OZ zafunguje typicky během 1s. Tato doba postačuje v 90% případů k deionizaci okolí v místě zkratu a k obnovení izolační schopnosti. V několika případech dojde k působení OZ na několika vedeních současně. [1],[2]



Obr. 1.3: OZ v rozvodné síti vn [2]

Na obrázku 1.3 vznikla porucha na napájecím vedení 1. U zákazníka připojeného k tomuto vedení dojde ke krátkodobému přerušení napětí (desetiny sekund). U zákazníka, připojeného k jinému vedení než na kterém vznikla porucha, dojde k poklesu napětí. Tyto průběhy jsou znázorněny na obrázku 1.4. [2]



Obr. 1.4: Průběhy napětí a proudu se spolupůsobením OZ [29]

### 1.2.2. Šíření poklesů napětí

Poklesy napětí se přenášejí po vedení, buď jen do distribuční soustavy, kde porucha vznikne (u krátkodobých poklesů), nebo se šíří jako redukováné poklesy napětí i do jiných distribučních soustav. Podle tohoto rozlišujeme přenos přes transformátory a šíření přes různé napěťové hladiny.

- **Vznik poruchy na straně nn u transformátoru vn/nn**

Poruchy, které vzniknou na straně nn, ovlivní jen málo pokles napětí na straně vn. Tento pokles na straně vn lze popsat vztahem:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{X_K}{X_K + X_T} = \frac{1}{1 + \frac{u_K S_K}{S_T}} \quad (1.1)$$

$S_K$  zkratový výkon

$X_K$  odpovídající reaktance vn soustavy

$S_T$  výkon transformátoru

$u_K$  napětí nakrátko transformátoru

$X_T$  reaktance transformátoru



Přenos do vn se může většinou zanedbat, protože např. u transformátoru 22/0,4 kV s výkonem 1000 kVA, kde vedení má 200MVA zkratový výkon, se pokles napětí šíří do 10%

- **Vznik poruchy na straně vn u transformátoru vvn/vn**

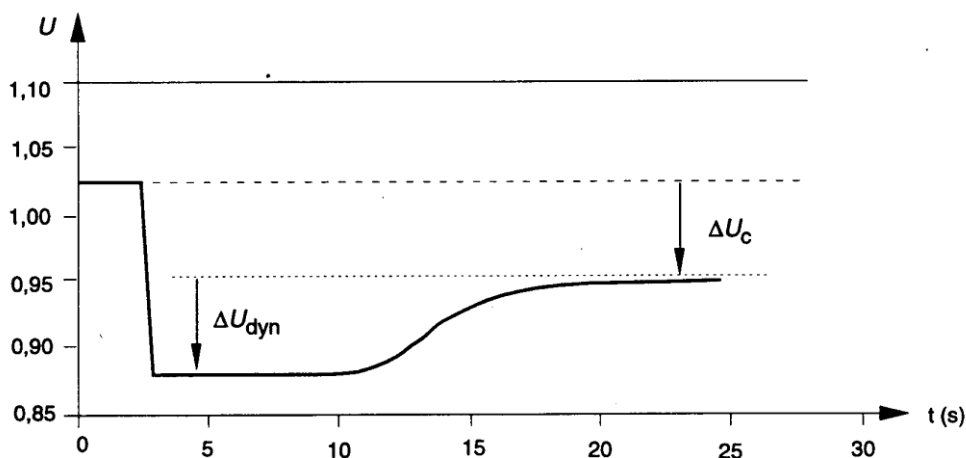
Při přenosu poruchy mezi sítěmi vn a vvn vznikne větší ovlivnění strany vvn než v předchozím případě. K výpočtu můžeme opět použít vzorec (1.1).[2]

### 1.2.3. Poklesy napětí způsobené odběrateli elektrické energie

Odběratel elektrické energie, může kvalitu energie a poklesy napětí ovlivňovat tím, za jakých podmínek a jaká zařízení bude připojovat do elektrizační soustavy. Závažné poklesy může způsobit připojení zejména velké zátěže. Dalším ovlivňujícím faktorem mohou být komutační poklesy tyristorových měničů.

#### Poklesy způsobené připojením velkých zátěží k síti

Po připojení velké zátěže např. velký pohon, je záběrný proud několikrát větší, než normální provozní proud. Tento záběrný proud způsobí pokles napětí, protože vedení je dimenzováno na proud provozní, nikoli na záběrný. Velikost poklesu napětí je závislá na tzv. tvrdosti sítě. Změny napětí by se měly omezovat v takové míře, aby ustálený stav provozního napětí byl v pásmu dohodnutého napětí. Toto je na obrázku 1.5. Tvrdost sítě závisí na impedanci sítě ve společném napájecím bodě. Čím nižší je impedance tím je síť tvrdší. [2], [4]



Obr. 1.5: Ustálený stav změny napětí  $\Delta U_c$  a dynamická změna napětí  $\Delta U_{dyn}$  [29]

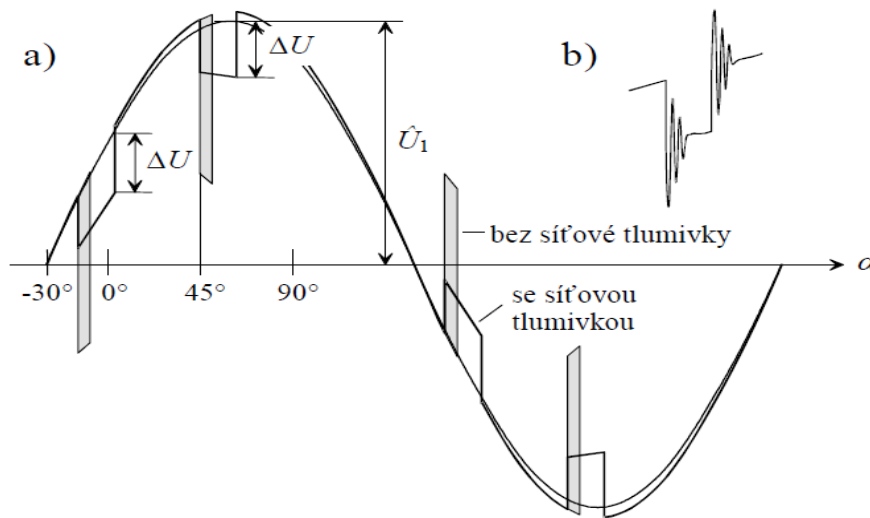
Relativně velká dynamická změna proudu  $\Delta I$  způsobující  $\Delta U_c$ , jež vzniká právě připojením velkých pohonů, je považována za rušivý jev i v případě, že je v mezi dohodnutého napětí.

Zátěže, které způsobují relativně velké změny napětí:

- Provozování obloukových pecí
- Provozování elektrických svářeček
- Rozběhy motorů
- Spínání kondenzátorů

## Komutační poklesy

Při provozu usměrňovačů je charakteristický periodický výskyt krátkodobých poklesů napětí a to z důvodu zkratu, který vzniká při každé komutaci mezi dvěma fázovými vodiči a trvá do úplného převzetí proudu další diodou resp. tyristorem. Úhel otevření  $\alpha$  určuje hloubku komutačních poklesů. Největší hloubka poklesu je při  $\alpha = 90^\circ$  z čehož vyplývá, že neřízený diodový usměrňovač z tohoto pohledu nemá zásadní vliv na hloubku komutace. Na obrázku 1.6 je vidět průběh fázového napětí 6-pulzního usměrňovače, který má úhel otevření  $\alpha = 45^\circ$ . Část obrázku b zobrazuje komutační zákmity na začátku a na konci komutace.



Obr. 1.6: Komutační poklesy napětí a) průběh 6-pulzního usměrňovače b) komutační zákmity na začátku a konci komutace [5]

Z obr. 1.6 je vidět, že omezení hloubky vniku lze realizovat předřazením síťové tlumivky. Tato tlumivka na druhou stranu prodlužuje dobu komutace. Relativní hloubka komutačního poklesu označována jako  $d_{KOM}$  je stanovena jako největší odchylka  $\Delta U$  napětí sítě od okamžité hodnoty napětí základní harmonické  $\widehat{U}_1$ .

$$d_{KOM} = \frac{\Delta U_{KOM}}{\widehat{U}_1} \quad (1.2)$$

Hodnota  $d_{KOM}$  by neměla ani v nejnepříznivějším přípojném bodě překročit hodnoty: pro nn:  $d_{KOM} = 0,10$  a pro vn:  $d_{KOM} = 0,05$

Pro dodržení mezních emisních hodnot, se předradí usměrňovači vhodná síťová tlumivka. Touto tlumivkou se změní poměr reaktance sítě a  $X_N$  a reaktance  $X_{KOM}$ . Hloubka komutačních poklesů se zmenší v poměru děliče napětí.

$$\frac{X_{kV}}{X_{kV} + X_{KOM}} \quad [\Omega; \Omega] \quad (1.3)$$

$X_{kV}$  je reaktance sítě v přípojném bodě  $X_{KOM}$  součet reaktancí mezi přípojným bodem a usměřovačem.

Indukčnost komutační tlumivky lze vypočítat:

$$L_{KOM} = \frac{1}{2 * \pi * f} * u_{kKOM} * \frac{U^2}{S_{rStr}} \quad [H; Hz; V; VA] \quad (1.4)$$

$L_{KOM}$  indukčnost komutační tlumivky  $X_{KOM}$

$f$  kmitočet sítě (50Hz)

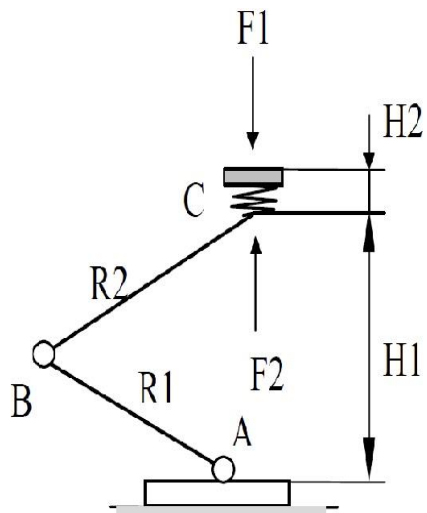
$u_{kKOM}$  relativní napětí nakrátko komutační tlumivky  $X_{KOM}$

$U$  sdružení napětí sítě

$S_{rStr}$  výkon usměřovače [5]

#### 1.2.4. Poklesy/přerušení napětí vzniklé odskokem sběrače od trakčního vedení

V oblasti elektrické trakce je důležité docílit konstantního odběru trakčního proudu. Toto zajistíme především konstantní přitlačnou silou sběrače, jež působí na trolejové vedení.



Mezními hodnotami jsou maximální a minimální přitlačná síla. Minimální přitlačná síla je významným kritériem kvality proudového odběru pro zamezení oblouku a přerušení kontaktu sběrače s trakčním drátem. Střední hodnota přitlačné síly je 100N (maximálně 200N) pro střídavou trakci a 120N (maximálně 250N) pro stejnosměrnou. V 99,8% hodnotách leží tato přitlačná síla v rozmezí největší dynamické kontaktní přitlačné síly ( $F_S + 3\sigma$ ) a nejmenší dynamické kontaktní přitlačné síly ( $F_S - 3\sigma$ ). Kde  $\sigma$  je standardní odchylka (čím je menší, tím více konstantní je přitlačná síla) a  $F_S$  je střední hodnota přitlačné síly. Pro dobrý kontakt sběrače s trolejí musí být sekundární vypružení sběrače schopno sledovat průběh síly  $F_1$ . [6]

Obr. 1.7: Rozložení sil  $F_1$  a  $F_2$  na sběrači [6]

## 2. Nesymetrie, neharmonické, flickr a jejich vliv na pohon

Mezi problémy, které mohou nastat v síti a jsou pro provoz pohonů, především s polovodičovými prvky, velmi důležité patří nesymetrie, neharmonické a kolísání napětí tzv. flickr. Tato kapitola bude zaměřena na vznik těchto nepříznivých vlivů, a dále na negativní účinky, které jsou těmito poruchami vyvolány.

### 2.1. Nesymetrie

Nesymetrie lze rozdělit podle jejich projevu na amplitudovou nesymetrii napájecí soustavy a na fázovou nesymetrii napájecí soustavy.

- Amplitudová nesymetrie napájecí soustavy vzniká při nesplnění podmínky o stejné amplitudě napájecího napětí a proudu.
- Fázová nesymetrie napájecí soustavy vznikne při nedodržení fázového posuvu napětí a proudu. V souměrné třífázové soustavě je to hodnota  $120^\circ$

Pro vyčíslení nesymetrie napětí případně proudu v trojfázovém systému se používají symetrické složky, někdy také označovány jako tzv. „Fortescue“. Trojfázový systém se rozloží na sousledný (stejnoseměrný), zpětný a netočivý (nulový) systém, který je označován s indexy d, i, h, někde také jako 1, 2, 0. Indexy u, v, w uvádějí, jak je zvykem, fázi. Výpočet je proveden pomocí maticových transformací. [7]

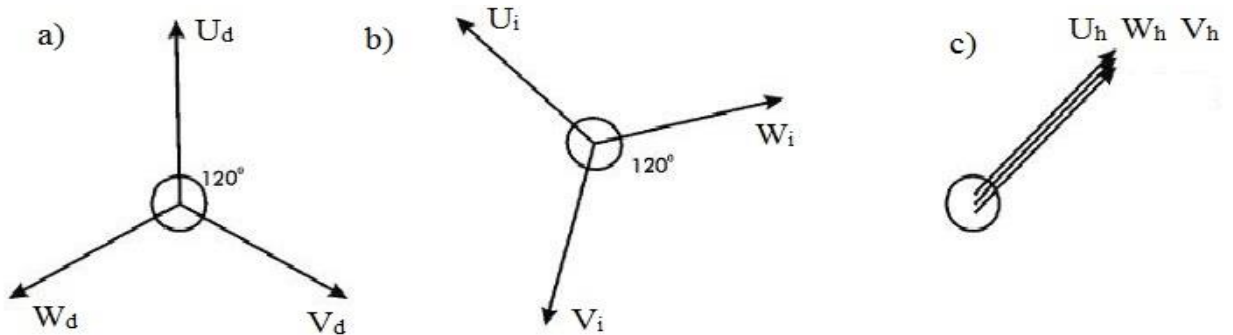
$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_i \\ U_h \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

kde  $a$  je definováno jako:  $a = e^{-j120^\circ}$

Ze symetrických složek lze získat zpět původní napětí nebo proudy inverzní transformací:

$$\begin{bmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_i \\ U_h \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Složky, na které jsme transformovali trojfázový systém, odpovídají dle obrázku 2.1. Složka sousledná tedy odpovídá kladnému točivému poli. Zpětná složka odpovídá zápornému točivému poli. Nulová složka se stejným fázovým posuvem pouze osciluje. [7]



Obr.: 2.1. Zobrazení symetrických složek a) sousledná složka b) zpětná složka c) nulová složka [7]

Měření těchto složek je v praxi obtížné. Pro zpracování je vhodné použít digitálních měřicích přístrojů. Pro určení velikosti nesymetrie využijeme poměr amplitudy zpětné a sousledné složky napětí, popřípadě proudu. Činitel nesymetrie se označuje  $\rho$  a vypočítá se: [7]

$$\rho_U = \frac{U_i}{U_d} 100 \% \quad (2.3)$$

Pro jednodušší výpočet činitele nesymetrie, při kterém nemusíme provádět transformace, použijeme vzoreček:

$$\rho_U = \frac{S_L}{S_K} 100 \% \quad (2.4)$$

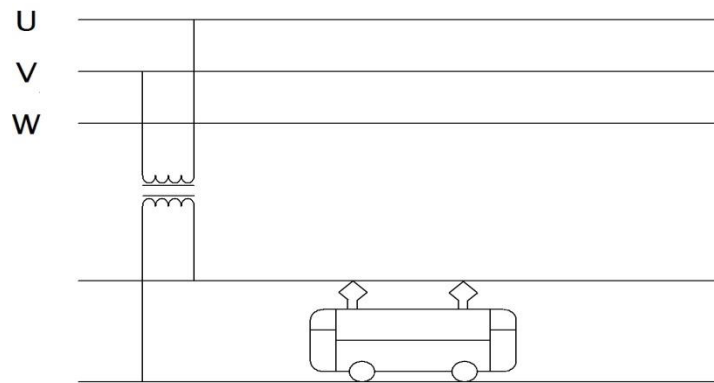
$S_L$  je zdánlivý výkon zátěže

$S_K$  zkratový výkon napájecího obvodu

### 2.1.1. Zdroje nesymetrie

Hlavní zdroje v distribuční soustavě z principu nejsou zdrojem nesymetrií. Mezi takové zdroje patří hlavně synchronní generátory nebo ve větrných elektrárnách používané asynchronní generátory. Naopak nekonvenční zdroje, jako fotovoltaické články, jsou k síti nn připojeny pomocí jednofázových elektronických střídačů. V připojovacím bodě je nízký zkratový výkon a vycházíme-li ze vzorečku 2.4, je tu vyšší možnost vzniku nesymetrie než u sítí vn, které mají větší zkratový výkon. [7]

K nesymetrii dochází především z důvodu jednofázového zatížení trojfázového systému. V sítích nn je to naprostá většina spotřebičů. Tyto zařízení jsou připojeny mezi fázový vodič a střední vodič. V praxi je snaha o rovnoměrné rozložení mezi všechny 3 fáze, ale nikdy toho není 100% dosaženo. U soustavy vn je nesymetrie způsobena značnými jednofázovými či dvoufázovými odběry. Jako významné tyto odběry lze uvažovat trakční transformovna pro střídavou trakci odr. 2.2. nebo jednofázové vysoké pece. [8]



Obr. 2.2 Střídavá trakce jako nesymetrie v napájecí soustavě

## 2.2. Neharmonické průběhy

Průběhy elektrických veličin často uvažujeme zjednodušeně jako periodické a harmonické. V praxi se ovšem vyskytují průběhy, které mohou být sice periodické, alespoň v nějakém časovém intervalu, ale mají neharmonický průběh. Takovéto neharmonické veličiny rozkládáme na nekonečnou řadu, která je složena z konstanty a harmonických veličin. Tyto veličiny mají poté kmitočet, který se rovná přirozeným násobkům základního kmitočtu. Rozklad uskutečníme harmonickou analýzou a vzniklá řada se nazývá Fourierova řada. [9]

### 2.2.1. Fourierova řada

Abychom mohli neharmonické průběhy rozložit na nekonečnou řadu, musí funkce splňovat Dirichletovy podmínky. To znamená, že funkce musí být v intervalu  $\langle 0; T \rangle$  po částech spojitá, jednoznačná, konečná a musí mít konečný počet maxim a minim. Funkce  $f(t)$  je periodická, pokud platí pro všechna  $t$ :

$$f(t) = f(t + T) \quad (2.5)$$

Fourierova řada periodické funkce, která má úhlový kmitočet  $\omega$  má tvar:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)] \quad (2.6)$$

Kde  $h$  je řád harmonické

Fourierovy koeficienty jsou  $a_0, a_h, b_h$

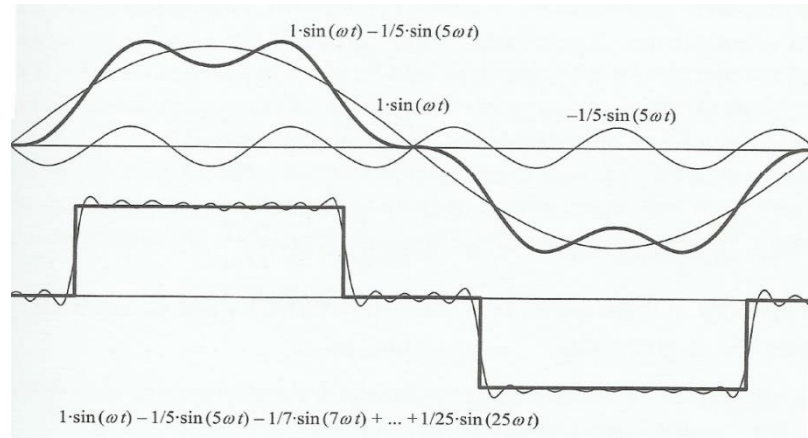
$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.7)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt \quad (2.8)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt \quad (2.9)$$

$h=1,2,3,\dots$

V praktických případech je nutné stanovit maximální řád harmonických, který bude pro analýzu dostatečně přesný. V oblasti elektrických pohonů vychází z norem nutnost analyzovat průběh do řádu  $h=50$ . Na obrázku 2.3. je zobrazen obdélníkový signál vzniklý součtem Fourierovy řady.

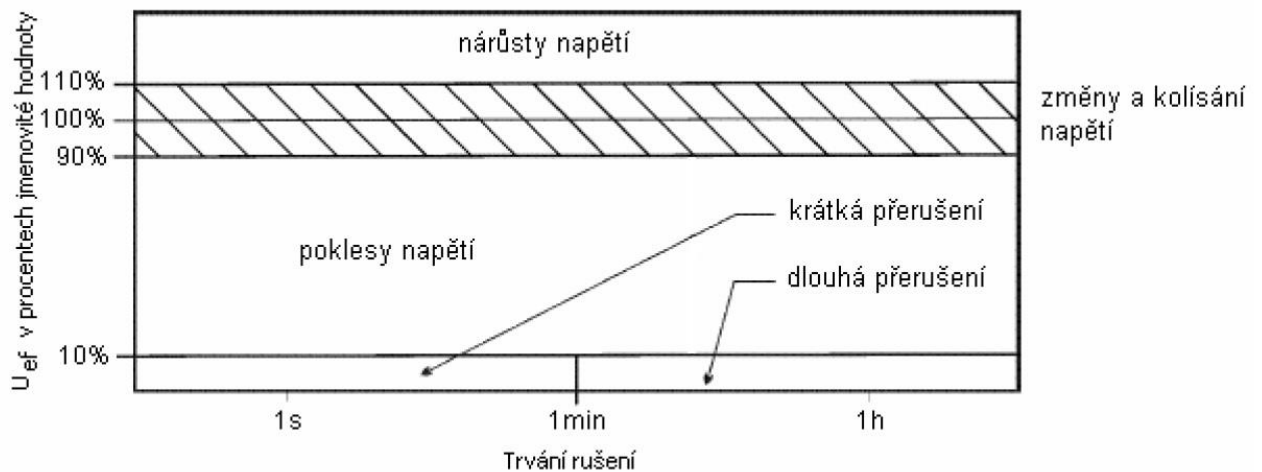


Obr. 2.3. Obdélníkový signál vzniklý součtem Fourierovy řady [9]

### 2.3. Flickr

Flickr nebo také blikání je důsledkem kolísání napětí. Toto kolísání lze pozorovat jako cyklické změny svítivosti svítidel. Flickr může vznikat rušením ve výrobě nebo přenosu a distribuci elektrické energie.

Na obr. 2.4. je vyobrazeno v jakých hodnotách efektivní hodnoty napětí se vykytuje flickr, dále je zde zobrazeno pro jaké hodnoty se jedná o pokles a přerušení napětí. [10]



Obr. 2.4. Vyobrazení změn napětí [10]

Z obr. 2.4. je zřejmé, že flickr se uvažuje od 110% do 90%  $U_{ef}$ . [10]

### 2.3.1. Vznik flikru

Hlavní příčinou změny napětí je časová změna jalového výkonu na proměnlivé zátěži.

$$\frac{\Delta U}{U_0} \cong \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.10)$$

$\Delta U$  změna napětí

$U_0$  napětí na svorkách zátěže

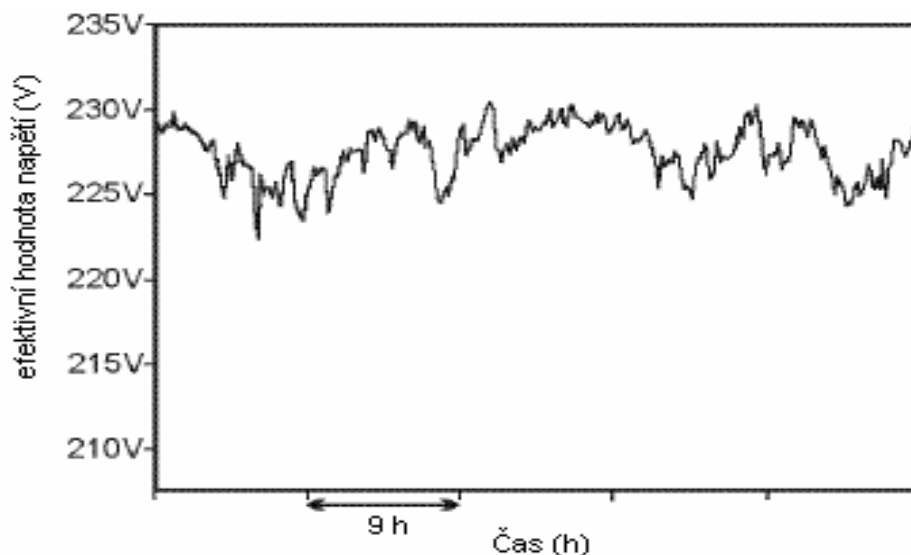
$Q$  jalový výkon zátěže

$S_{kz}$  zkratový výkon v místě připojení zátěže

Tyto zátěže jsou obvykle obloukové pece, pohony ve válcovnách. Jsou to zátěže s velkým počtem změn výkonu. Zdrojem flikru mohou být také zátěže s malým výkonem, například rozběh indukčních motorů, svářečky, pumpy, kompresory, výtahy. Další zdroj kolísání je spínání kompenzačních kondenzátorů a přepínání transformátorových odboček. Kolísání vzniká i při generování výkonu například u větrných elektráren. [10]

### 2.3.2 Účinky flikru

Kolísání napětí způsobuje kromě škodlivých technických efektů také fyziologické efekty, které mají za následek provozní chyby a sníženou koncentraci. Flikr může způsobit výpadky výrobních technologií, například nesprávný provoz stykačů a relé. [10]



Obr. 2.5. Kolísání efektivní hodnoty napětí [10]



## Účinky na elektrické stroje

Je-li kolísání napětí na svorkách indukčního asynchronního motoru, vede to ke změně otáček a skluzu a tím pádem se to negativně projeví i na celém výrobním procesu. V nejhorších případech se flickr projeví v nadměrných vibracích a to vede ke snížení životnosti. Synchronní stroje a synchronní generátory jsou flickrem postiženy nárůstem kmitání a dřívějšímu opotřebením rotoru.

## Účinky na statické usměrňovače

U fázově řízených usměrňovačů se účinek kolísání napětí projevuje zhoršením účinníku, generováním necharakteristických harmonických a interharmonických. Při režimu brzdění v invertorovém chodu může flickr vést k poruchám komutace a následným poškozením prvků.[10]

### 2.3.3 Omezení flickru

Jak plyne z rovnice 2.10, jsou dvě možná řešení pro omezení amplitudy kolísání napětí.

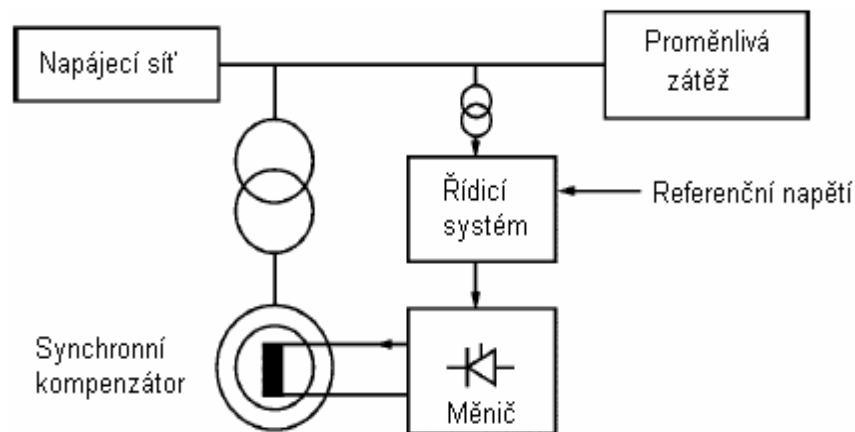
- **Zvýšení zkratového výkonu**  
Připojení zátěže na vyšší jmenovité napětí  
Zvýšení jmenovitého výkonu transformátoru, který napájí kolísavou zátěž  
Připojení sériových kondenzátorů
- **Omezení změn jalového výkonu**  
Připojení dynamických kompenzátor nebo stabilizátorů

## Dynamické napěťové stabilizátory

U těchto zařízení jsou důležité parametry jejich jmenovitý výkon a rychlost reakce.

## Synchronní stroje

Synchronní stroje mohou pracovat v induktivním nebo kapacitním režimu. Pro dostatečnou rychlost reakce, je potřeba uzavřené regulační smyčky, s rychlým řízením budícího proudu. Toto řízení obr. 2.6. umožňuje rychlý časový nárůst jalového proudu stroje. [10]



Obr.2.6.Synchronní kompenzátoř pro stabilizaci napětí [10]

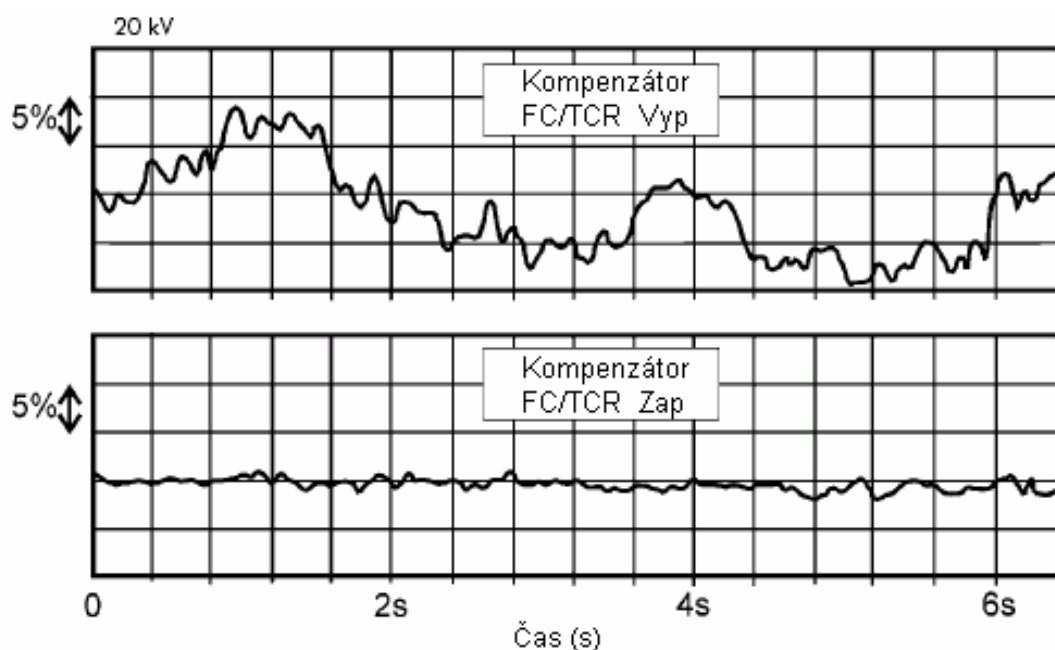
### Statické kompenzátory

Obsahují kapacitní i induktivní pasivní prvky, které jsou spínány a fázově řízeny. Dodávají požadovaný jalový výkon. STATCOM jsou nejlepším poměrem technického a ekonomického hlediska.

Dále existují pro kompenzaci reaktory s vlastním sycením nebo reaktory se stejnosměrným řídicím obvodem.

Kompenzátor s tyristory řízeným reaktorem (TCR) a pevnými kondenzátory (FC)

Jedná se o řešení nepřímé kompenzace. V závislosti na požadované funkci může fungovat jako stabilizátor napětí nebo jako kompenzátor jalového výkonu. Na obr 2.7. je vidět jak tento typ kompenzace vyhladí kolísání napětí. [10]



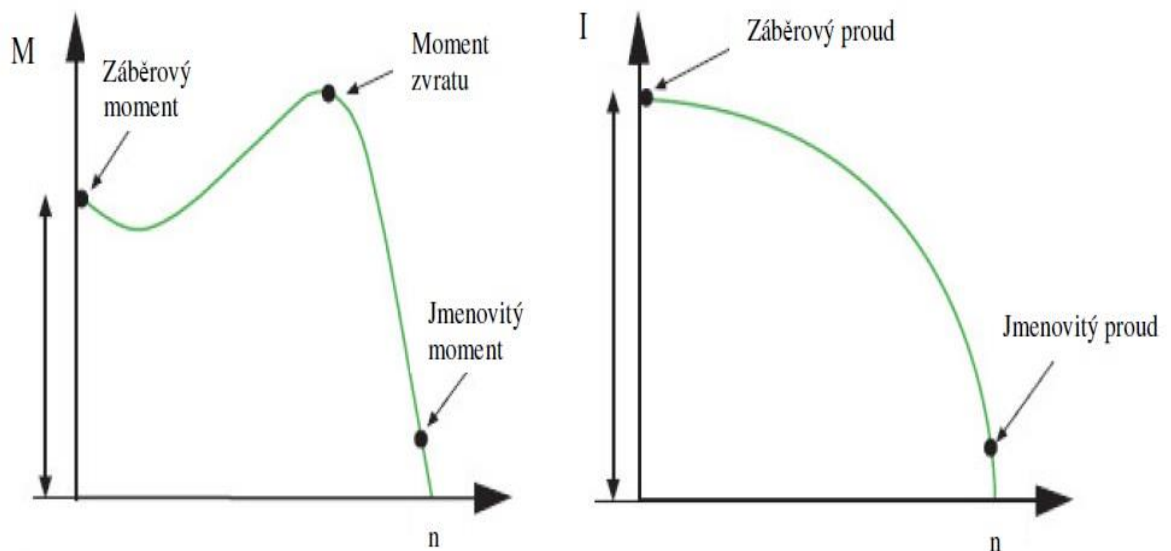
Obr. 2.7. Příklad vyhlazení kolísání napětí pomocí FC/TCR [10]

### 3. Negativní působení poklesu napětí na vybrané typy pohonů

Poklesy napětí způsobují celou řadu negativních účinků na elektrické pohony. Ať už to jsou účinky přímo na samotný motor nebo komplexně na celý pohon. U motorů se takovéto účinky projeví především jako pokles nebo kolísání momentu. U polovodičových měničů zas takovýto pokles může způsobit problémy se samotným řízením, zablokování měniče a v nejhorším případě i vyhoření části měniče.

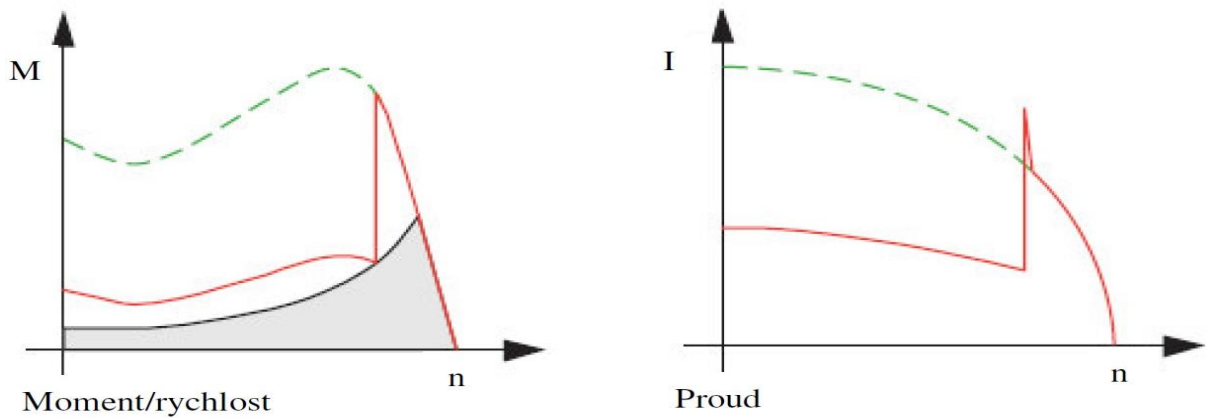
#### 3.1. Asynchronní motor připojený přímo k síti

Asynchronní motory jsou dnes nejpoužívanější pohony. Značná část těchto pohonů se provozuje přímo napojených na napájecí síť. Nevýhoda tohoto přímého připojení k síti je nemožnost omezení vysokého záběrného proudu. Hodnota záběrného proudu se pohybuje kolem 6-7 násobku jmenovitého proudu, u těžkých rozběhů je tato hodnota až 9-10 násobek jmenovitého proudu. Tato metoda se dá tedy využít u těžkých rozběhů.



Obr. 3.1. Momentová charakteristika ASM, při přímém připojení motoru k síti[11]

Další možnosti připojení asynchronního motoru k síti jsou již s omezením záběrného proudu, aby se nenamáhala napájecí soustava. V těchto aplikacích se řeší především rozběh motorů. Mezi nejčastější rozběhy patří rozběh hvězda/trojúhelník. U této metody je omezen záběrný proud i záběrný moment. Motor je zapojen nejprve do hvězdy, kde je  $\sqrt{3}$  krát menší napětí a třetinový výkon, poté je přepnuto například pomocí stykačů do trojúhelníka. Na obr. 3.2. lze vidět momentovou charakteristiku a proud při přepínání hvězda/trojúhelník. Přepnutí vede k vysokým proudovým a momentovým špičkám, které způsobují namáhání izolace motoru. Jelikož tento rozběh má při zapojení do hvězdy nízký záběrný moment, nemůže se připojit zátěž, která je větší než 50% jmenovitého momentu. [11]

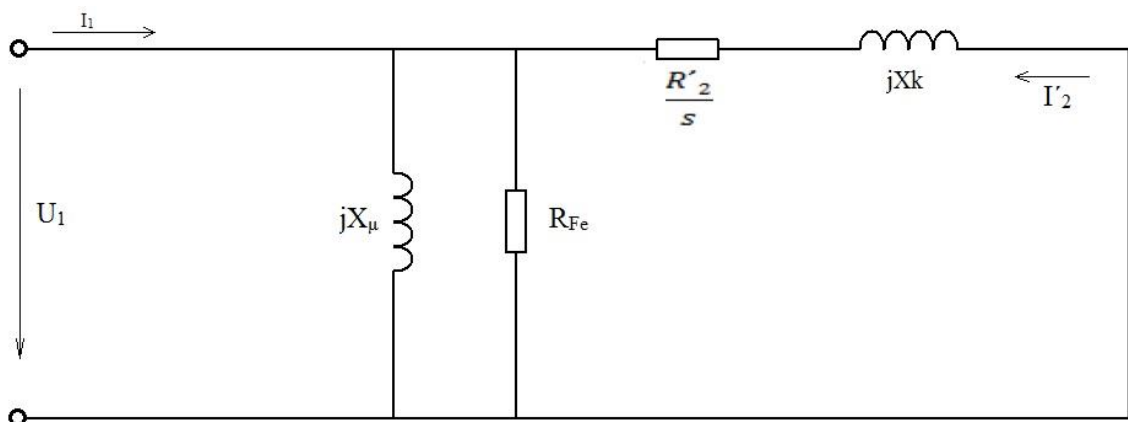


Obr. 3.2. Přepínání hvězda/trojúhelník [11]

Další možností spuštění asynchronního motoru je použití softstartu. Softstartér obsahuje v každé fázi dva antiparalelně řazené tyristory. Regulace spočívá ve snižování/snižování napětí v každé fázi po stanovenou dobu. Postupně se zvyšuje napětí a tím i rozběhový proud a moment. Rozběh motoru je plynulý.

### 3.1.1. Moment asynchronního motoru

Momentová charakteristika je již zobrazena v nadřazené kapitole. V matematickém vyjádření vycházíme nejprve z náhradního schématu. Náhradní schéma upravíme dále do zjednodušené podoby zobrazené na obr. 3.3. [12]



Obr. 3.3. Zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru [12]

Moment motoru odvozený z tohoto náhradního schématu je:

$$M = \frac{m_1}{\omega_1 s} R'_2 \frac{U_1^2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_k^2} = \frac{m_1}{\omega_1} R'_2 \frac{s U_1^2}{R_2'^2 + s^2 X_k^2} \quad (3.1)$$

M- moment motoru

m- počet fází

$\omega$ - úhlová rychlost

$U_1$  – napájecí napětí

$s$  – skluz

$X_k$  – podélná reaktance

Chceme-li zjistit maximální moment, musíme uvažovat maximální skluz  $s_{max}$  při kterém je hodnota  $R_1=0$ .

$$M_{max} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 X_k} \quad (3.2)$$

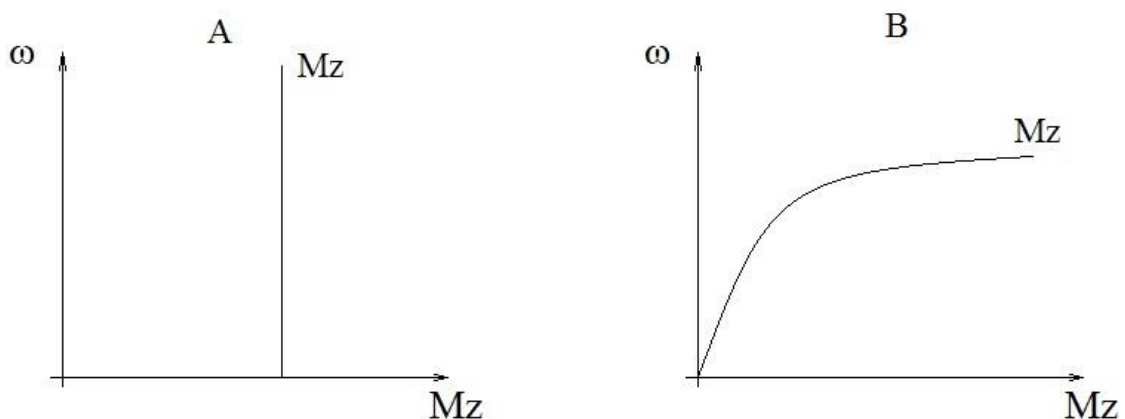
Záběrný moment

$$M_{záb} = \frac{m_1 R'_2}{\omega_1} \frac{U_1^2}{R'_2 + X_k} \quad (3.3)$$

Zvolíme-li vhodně  $R'_2$ , můžeme dosáhnout stavu, kdy záběrný moment je maximální moment. [12]

Z těchto rovnic pro moment lze vidět, že moment závisí na kvadrátu napájecího napětí. To znamená, že pokud klesne napětí 2x, pak moment klesne 4x. Zde je zjevně vidět, za jakých podmínek bude vadit neplánovaný krátkodobý pokles napětí.

Jedná se především o spouštění motorů, které mají velký zátěžný moment již od nulových otáček. Mezi tyto pohony patří například zvedání břemene (výtah, jeřáb). Tyto případy mají konstantní záběrný moment. Na druhou stranu v případě, že motor se rozeběhá s malým či nulovým záběrným momentem, který se zvyšuje postupně s nabývajícím otáčkami, nemá krátkodobý pokles napětí zásadní vliv na rozběh motoru. Příkladem těchto pohonů je ventilátor, odstředivé čerpadlo nebo turbokompresory. U takovýchto pohonů roste moment kvadraticky s otáčkami a výkon je závislý na třetí mocnině otáček.



Obr. 3.4. A) Charakteristika konstantního záběrného momentu B) Charakteristika ventilátoru

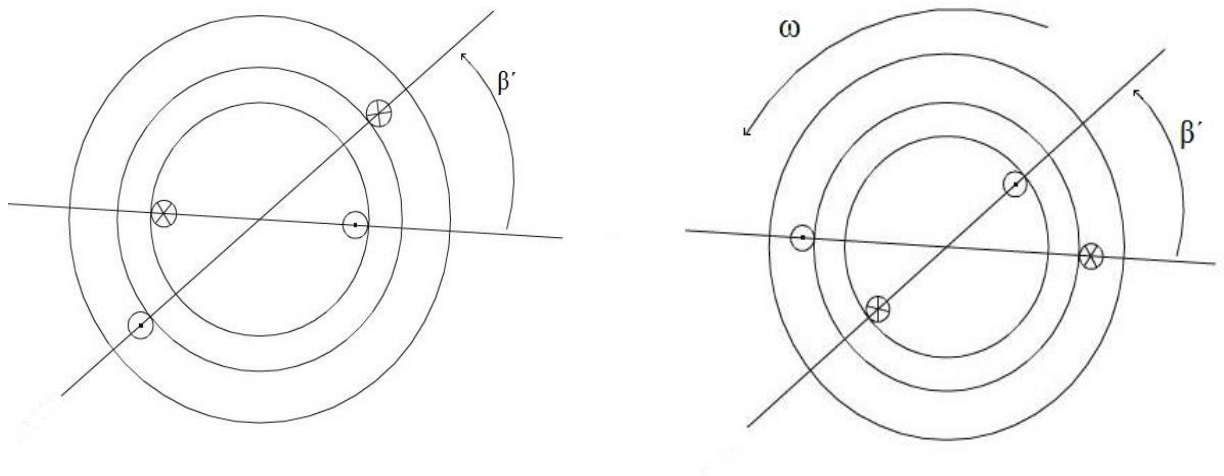
### 3.2. Synchronní motor přímo připojený k síti

Synchronní motory patří mezi střídavé stroje, které lze provozovat přímo připojené k síti, nebo jdu řídit pomocí polovodičových měničů. Synchronní stroje se obvykle používají jako synchronní generátory, pracující jako zdroje v energetické soustavě. Jako motory často pracují v přebuzeném režimu běžící naprázdno a kompenzují.

Synchronní stroj má oproti asynchronnímu jiný princip a je jiné i konstrukční uspořádání. Zásadní pro práci synchronních strojů je točivé pole, které je tvořeno stejně jako u asynchronních motorů ve statoru, který je napájen z třífázové sítě. Oproti asynchronnímu motoru druhé (rotorové) pole je tvořeno budícím vinutím nebo permanentními magnety. Navíc se tyto dvě točivé pole spolu otáčejí stejnou synchronní rychlostí.

$$\text{Synchronní rychlost točivého pole: } \omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (3.4)$$

Tyto dvě pole jsou vzájemně natočeny o zátěžný úhel  $\beta$ . Podle toho, jak je synchronní stroj provozován, bude se pole statoru předbíhat nebo naopak zpožďovat oproti poli rotoru. Na obr. 3.5. je vidět synchronní stroj v režimu motor i v režimu generátor.



Obr: 3.5. Synchronní stroj v režimu motor a v režimu generátor

Co se týče konstrukce, pak lze hovořit o dvou základních druzích. Stroj s hladkým rotorem, neboli turbostroj, nebo stroj s vyniklými póly. Stroj s hladkým rotorem je obvykle dvoupólový, kdežto stroje s vyniklými póly mívají velký počet pólů. Není-li buzení realizováno permanentními magnety, je přivedeno do rotoru pomocí kroužků. [13]

### 3.2.1. Moment synchronního motoru

Pro moment synchronního stroje se vychází ze zjednodušených požadavků, tj. nulové ztráty. Předpokládáme  $R_a = 0$ , čím je výkon stroje větší tím, menší chyba tímto zjednodušeným nastane. U strojů s malým výkonem tato chyba může být zásadní a dochází k posuvu momentové charakteristiky. Momentová rovnice vycházející ze zjednodušených předpokladů:

$$M_i = \frac{m}{\omega_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \sin\beta \quad (3.5)$$

$m$  – počet fází

$\omega_s$  – synchronní rychlost

$U$  – napájecí napětí

$U_{ib}$  – budící napětí

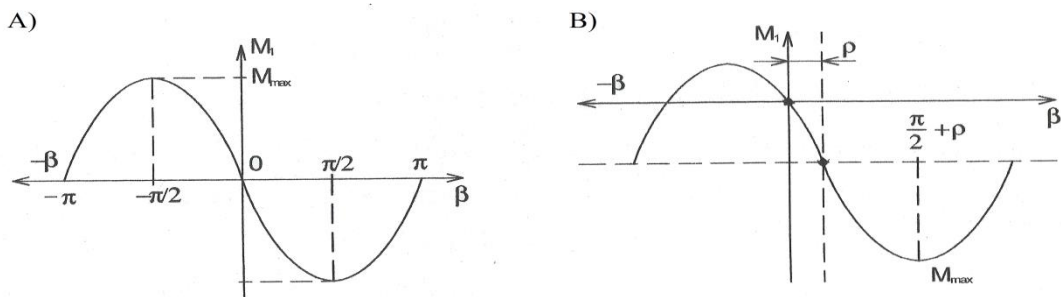
$X_d$  – podélná reaktance

Z této momentové rovnice je jasně vidět, že je moment ovlivněn jak napájecím napětím  $U$ , tak napětím budícím  $U_{ib}$ . Oproti asynchronnímu motoru, není pokles napětí tak závažný z hlediska ztráty momentu. U asynchronního motoru je totiž kvadratická závislost, u synchronního je to závislost lineární. Záleží ovšem také na tom, jak je realizováno buzení. U strojů s permanentními magnety je za standartních podmínek buzení konstantní. Pokud však bude buzení stroje realizováno pomocí statických usměrňovačů nebo z rotačních zdrojů, může dojít k poklesu napětí. V tomto případě by teoreticky mohlo dojít k nejhoršímu stavu, kdy dojde k poklesu jak napájecího napětí, tak budícího napětí. Dojde k již znatelnému poklesu momentu. Moment lze vyjádřit i pomocí proudu nakrátko  $I_k$ , protože:

$$I_k = \frac{U_{ib}}{X_d} \quad (3.6)$$

Pak tedy můžeme napsat:

$$M_i = \frac{m}{\omega_s} U I_k \sin\beta = \frac{pm}{\omega_1} U I_k \sin\beta \quad (3.7)$$



Obr. 3.6. Průběh momentu synchronního stroje A) pro  $R_a=0$  B) pro  $R_a \neq 0$  [12]

### 3.2.2. Rozběh synchronního motoru

Synchronní motor nelze z principu rozeběhat pouhým připojením k síti, jako asynchronní motor. Pro rozběh se používá několika dodatečných prostředků.

Nejjednodušší je rozběh pomocí jiného motoru. Motor se roztočí na otáčky, které jsou synchronní, poté se stroj nabudí a dále již běží na síti.

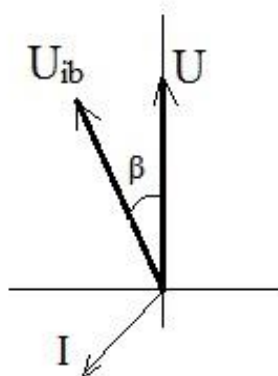
Větší motory mají tlumič, který má jako primární účel tlumení kývání motoru při přechodu rotoru do nové zátěžné polohy. Konstrukce tlumiče je v podstatě stejná jako konstrukce rotoru asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Tohoto je využito pro asynchronní rozběh. Při rozběhu nesmí být motor nabuzen. Po dosažení otáček blízkých synchronním se rotor nabudí a je vtažen do synchronismu.

Moderní rozběh synchronního stroje je realizován pomocí měniče kmitočtu. Měníčem se postupně zvyšuje napájecí frekvence. Pole rotoru stíhá pomalé zvyšování rychlosti pole statoru a dochází k rozběhu a následné regulaci synchronního stroje.

Dojde-li při rozběhu k poklesu napětí, tak záleží, který způsob je pro rozběh použit. Při asynchronním rozběhu může dojít k situaci, kdy moment, který klesá kvadraticky s napětím, nestačí k rozběhu velkého a těžkého rotoru synchronního stroje velkého výkonu.

### 3.2.3. Vypadnutí ze synchronismu

Tento jev u synchronních strojů nastává v situaci, kdy je překročen maximální zátěžný úhel  $\beta_{\max}$ . Zátěžný úhel  $\beta$  se změní při každé změně zatížení. U strojů s hladkým rotorem může být maximální úhel mezi fázorem magnetického toku statoru a rotoru maximálně  $90^\circ$ . Dojde-li k tomuto přetížení, motor se zastaví. K vypadnutí ze synchronismu dochází nejen mechanickým přetížením, ale také poklesem napájecího napětí. Klesne napájecí napětí, tím



pádem klesne i indukované napětí uvnitř stroje. Tím klesne i moment stroje a je-li motor zatížen tak již nezvládne překonávat zátěžný moment zátěže a dojde k zastavení rotoru a tedy k vypadnutí ze synchronismu. I když by po tomto napětí znovu stoupl na jmenovitou hodnotu, motor se sám od sebe nerozběhne a je potřeba využít nějaké metody pro rozběh popsané výše. Na obrázku 3.7. je zobrazen zjednodušený fázorový diagram, na kterém je vyznačen zátěžný úhel  $\beta$ .

Obr. 3.7. Fázorový diagram se zobrazením zátěžného úhlu



### 3.3. Asynchronní motor napájený z měniče kmitočtu

Pohony s asynchronními motory a měniči kmitočtu jsou dnes nejpoužívanější typ pohonů s polovodičovými měniči. Nástup těchto pohonů nastal v době rozvoje výkonové elektroniky. Měníče jsou různého typu s různými komponenty. Ovšem většina měničů je složena ze 3 základních částí. Je to usměrňovač, meziobvod a střídač. Existují 2 typy měničů kmitočtu. Jedná se o měnič kmitočtu s napěťovým střídačem a měnič kmitočtu s proudovým střídačem. Rozšířenější a používanější jsou měniče kmitočtu s napěťovým střídačem. [14]

Všechny tyto části měniče reagují na různé poruchy sítě a to jak jednotlivě, tak jako celá sestava. U asynchronních motorů napájených z měniče kmitočtu obvykle řídíme otáčky. Řízení otáček je částí systému měniče kmitočtu. Pokud dojde k přerušení napětí nebo k jiné poruše sítě tak závažné, že je alespoň jedna část systému odpojena, může dojít k přerušení činnosti celého systému. Odpojení části systému může být:

- Vnitřně řízené – systém řízení ochrany vyhodnotí kritické poruchy a dá příkaz k odpojení systému
- Externě řízený – když vnější složky systému jako například motor nebo regulátor požadují odpojení pohonu od provozu

Při odpojení systému řízení otáček můžeme pohon provozovat jako neřízen, provedením tzv. Bypassem, to znamená, že motor je přímo připojen na síť a vztahují se na něj problémy popsané v kapitole 3.1. Další externí řešení je automatický restart jednotky řízení otáček. Ovšem ne všechny mechanismy a procesy toto restartování umožňují. [15]

#### **Citlivost na třífázové poklesy**

Za odpojení pohonu během třífázového poklesu napětí jsou zodpovědné dva odlišné ochranné systémy. Podpěťová ochrana zareaguje tehdy, vybití-li se kondenzátor ve stejnosměrném meziobvodu a napětí v tomto meziobvodu klesne pod minimální povolenou hodnotu. Tato minimální hodnota může být různě nastavena. Například již od 50% jmenovitého napětí stejnosměrného meziobvodu, častěji ale v rozmezí zhruba 70 – 90 % . Nastavení této hladiny určuje, jak dlouho ochrana působí. Při nastavení 50% ochrana zasáhne pouze při přerušení nebo hlubokých poklesech napětí. Druhým systémem je systém nadproudové ochrany, který se aktivuje buď zvýšeným odběrem proudu při poklesu napětí nebo při vysokém spínacím proudu těsně po skončení poklesu, tedy bezprostředně po obnovení jmenovitého napětí vzhledem k nabití vybitého kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu. Maximální povolený proud je obvykle od 120% do 170% jmenovitého proudu pohonu. Obě tyto ochrany mohou být nastaveny buď přímo uživatelem, nebo jsou již pevně nastavené. [15]

Různé typy zátěže nemají zásadní vliv na toleranční křivku napětí. Typ zátěže může být konstantní, lineární nebo kvadratický. Při poklesu má nižší točivý moment zátěž lineární a kvadratická. Doporučuje se, aby při poklesu napětí, kdy se motor nezastaví, došlo k snížení otáček i točivého momentu (snížení výkonu) z toho důvodu aby nedošlo k přehřátí motoru. Toto však musí být jasně posouzeno v jakých aplikacích to je možné a v jakých nikoli. [15]

### Citlivost na dvoufázové poklesy

Dvě fáze se udržují na stejných hodnotách napětí a třetí fáze se mění ze jmenovitých otáček až na nulovou hodnotu. Tím se zvyšuje citlivost pohonu. Vliv různých typů zátěží na citlivost je ještě menší než u symetrických třífázových poklesů. [15]

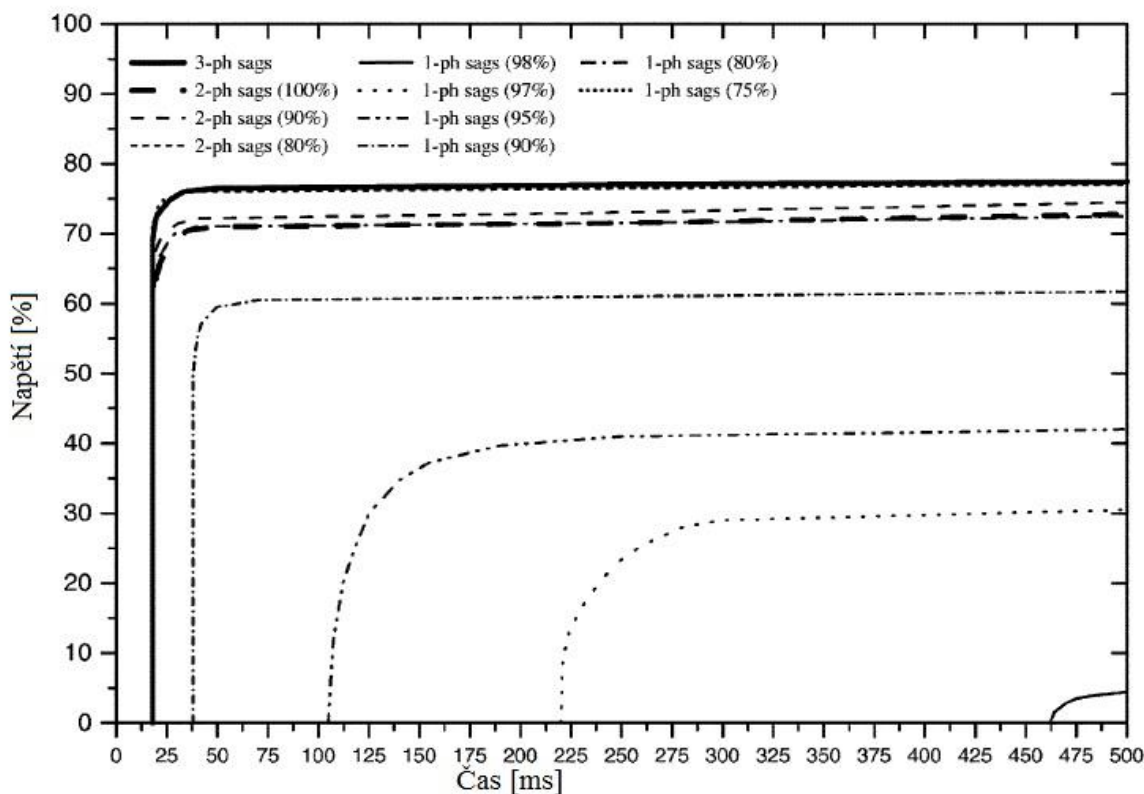
### Citlivost na jednofázové poklesy

Jedna fáze zůstává na jmenovitých hodnotách a zbylé dvě fáze mají snížené napětí. Tímto se rapidně zvyšuje citlivost pohonu. Jako v předchozích případech není vliv různých typů zátěží na toleranční křivku. [15]

### Provoz v uzavřené smyčce

Předchozí případy byly provozovány v otevřené smyčce. Při řízení rychlosti se používá uzavřená smyčka se snímačem rychlosti nebo polohy pro detekci referenčními a reálnými otáčkami motoru. Tato regulační smyčka přispívá k přesnější a rychlejší reakci pohonu. Mírně se zvýší citlivost vůči různým poklesům napětí, když se při provozu změní systém z otevřené smyčky na smyčku se zpětnou vazbou. [15]

Následující charakteristika je pro různé poruchy (třífázové, dvoufázové, atd.) a různé procentní poklesy napětí, kde jsou zobrazeny citlivostní toleranční křivky pro konkrétní řízení rychlosti. [15]



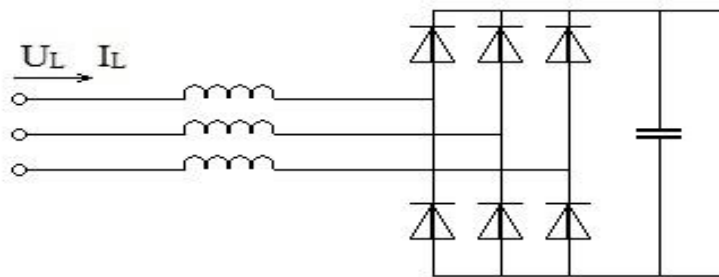
Obr. 3.8. Toleranční napěťové křivky pro různé poklesy [15]

Obvykle fázová nesymetrie, která je 3-5%, nemá moc významný vliv na pohon. Avšak existují pohony, které neumožňují normální provoz při nesymetrii i v případě, že jiné poruchy nenastaly. V takovém případě také dojde k odpojení pohonu pomocí ochranného systému.

Při zhodnocení tvaru a typu poklesu jasně dominuje typ poklesu. Tvarem se rozumí obdélníkový pokles. Odchyšky od obdélníkového tvaru nepředstavují zásadní problém při určování citlivosti pohonu. Typ a délka trvání poklesu je hlavní pro reakci pohonu. [15]

### 3.3.1. Vstupní usměrňovače měniče kmitočtu

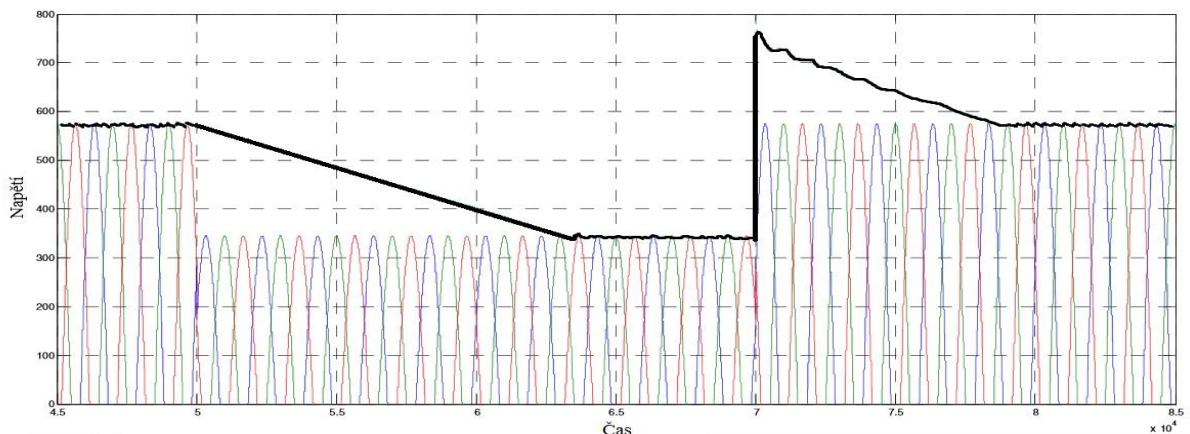
Usměrňovače v měniči kmitočtu slouží jako spotřebič energie ze zdroje a jako zdroj energie pro stejnosměrný meziobvod. Nejpoužívanější usměrňovače jsou klasický diodový, řízený tyristorový nebo napět'ový pulsní usměrňovač. Každý z těchto typů má své specifické vlastnosti a také specifické použití.



Obr. 3.9. Diodový usměrňovač

Neřízené diodové usměrňovače nemají velký vliv na řízení rychlosti pohonu při poklesech napětí nebo při fázových nesymetriích. [15]

Kondenzátor na straně stejnosměrného meziobvodu v době poklesu napětí odebírá velký proud (obr. 3.10.) z důvodu vlastního dobítí. V okamžiku, kdy se napětí vrátí zpět do normálu, nastávají přechodové děje napětí a proudu. Tento dobíjecí proud může dokonce spálit diody v usměrňovači, pokud nezasáhne ochrana a nevypne přívod. [16]



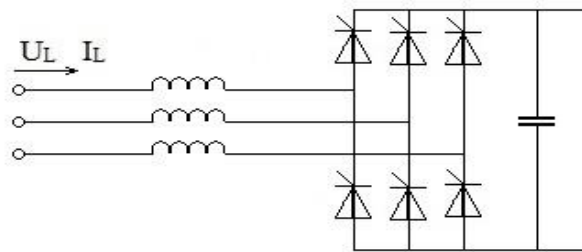
Obr. 3.10. Průběh proudu kondenzátoru po obnovení napětí na jmenovitou hodnotu [16]

## Řízené usměrňovače

Jako řízené usměrňovače se používají tyristorové usměrňovače, kde řídicí součástka je tyristor, nebo napěťové pulsní usměrňovače, kde je řídicí součástkou IGBT tranzistor.

### Tyristorové usměrňovače

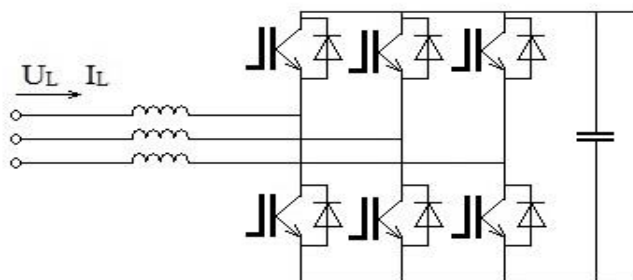
Tyristory se řídí řídicím úhlem  $\alpha$  od  $0^\circ$  do  $120^\circ$ . V případě  $\alpha = 0^\circ$  je měnič analogický s neřízeným diodovým usměrňovačem. Řídicím úhlem se řídí napětí na výstupu z usměrňovače, tedy napětí na stejnosměrném meziobvodu. Na řídicím úhlu je závislý i účinnost. Řízeným usměrňovačem jsou odebírány také složky vyšších harmonických. [17]



Obr. 3.11. Tyristorový řízený usměrňovač

### Napěťové pulsní usměrňovače

Řídicí součástky jsou IGBT tranzistory, které jsou řízeny pulsně šířkovou modulací. Díky vhodnému spínání tranzistorů mohou pulsní usměrňovače dosáhnout přibližně sinusového odběru proudu. Výhodou těchto měničů je dobrý účinnost a také možnost rekuperace. [17]



Obr. 3.12. Napěťový pulsní usměrňovač

#### 3.3.2. Stejnosměrný meziobvod měniče kmitočtu

Stejnosměrný meziobvod je vzhledem k usměrňovači spotřebič a vzhledem ke střídači zdroj. Hlavní část tohoto meziobvodu je kondenzátor  $C_{ss}$ , který se nabíjí a tím je zdrojem energie. Velikosti takového kondenzátoru bývají jednotky mF. Další část v meziobvodu je podélná indukčnost, která má za účel vyhladit výstupní napětí z usměrňovače, které je zvlněné. Další součástí, která je obvykle součástí stejnosměrného meziobvodu, je rezistor, který je spínán pulsním měničem a slouží pro brzdění pohonu.

### 3.3.3. Napěťový střídač

V dnešní době se se jako aktivní součástky využívají GTO, IGBT nebo IGCT. Pro řízení se využívá amplitudové řízení, šířkové řízení a šířkově pulzní řízení. Při rekuperaci nebo brždění pohonu střídač funguje jako pulsní usměrňovač. [18]

#### Amplitudové řízení

Při amplitudovém řízení je amplituda napětí vstupující do střídače ze stejnosměrného meziobvodu přímo úměrná amplitudě výstupního napětí. Tím pádem lze řídit výstupní amplitudu již na vstupu za předpokladu, je-li na vstupu řízený usměrňovač. Jestli tedy dojde k poklesu napětí ve zdroji a následně na stejnosměrném meziobvodu, na výstupu ze střídače bude toto napětí také nižší.

#### Šířkové řízení

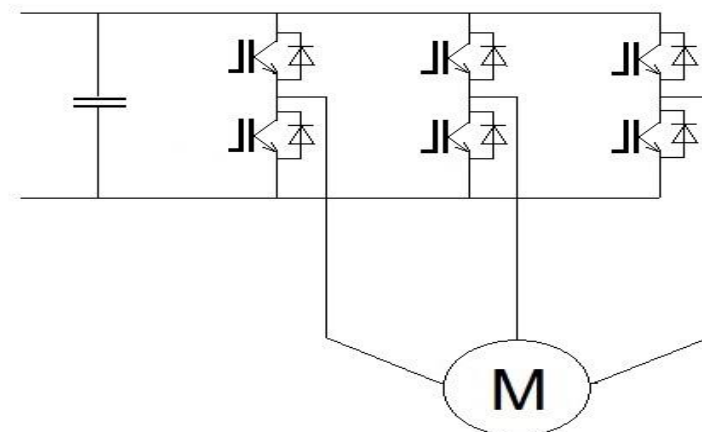
Toto řízení se používá u jednofázových střídačů tam, kde je ohmická zátěž, a nevádí tedy zvýšený výskyt harmonických. Toto řízení je nepoužitelné pro třífázové střídače.

#### Šířkově pulzní řízení

Je to nejpoužívanější způsob řízení střídačů. Řízení se provádí pomocí nosného a řídicího signálu. Nosný signál je pilovitý a vysokofrekvenční. Řídicí a nosný signál se komparují a tam, kde se protínají, vytvářejí řídicí signál pro tyristory. V ideálním případě by výstupní signál ze střídače měl být sinusový. Maximální amplituda fázového napětí je maximálně:

$$U_{10} = \frac{U_d}{2} \quad \text{kde } U_d \text{ je napětí v meziobvodu, a maximální sružené napětí je: } U_{Zm} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_d$$

Když se vhodně nastaví průběh modulačního signálu, dá se velikost 1. harmonické napětí zátěže zvětšit. Toto se dá realizovat sinusovým vrchlíkem, a dostaneme velikost fázového napětí  $U_{10} = \frac{U_d}{\sqrt{3}}$  a velikost sruženého napětí je  $U_{Zm} = U_d$ . [18], [19]

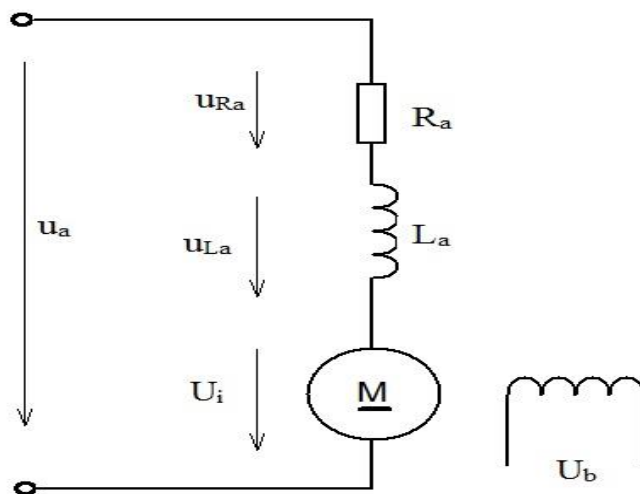


Obr. 3.13. Napěťový třífázový střídač

### 3.4. Stejnoseměrný motor napájený z tyristorového usměrňovače

Tento typ pohonu byl před nástupem asynchronních motorů s měniči kmitočtu nejpoužívanějším regulovaným pohonem. Jako měnič je použit řízený tyristorový usměrňovač a motor je stejnosměrný cize buzený, kde pro buzení je obvykle použit neřízený diodový usměrňovač. V dnešní době tyto pohony jsou stále využívány například v elektrické trakci nebo válcovnách. [17]

Otáčky stejnosměrného cize buzeného motoru lze řídit napětím kotvy a pro doregulování se používá odbuzování, čímž se otáčky ještě zvyšují.



Obr. 3.14. Elektrické schéma cize buzeného stejnosměrného motoru

V obvodu kotvy platí rovnice:

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + u_a \quad (3.8)$$

V budicím obvodu platí rovnice:

$$u_b = R_b i_b + N_b \frac{d\phi_b}{dt} \quad (3.9)$$

Pro ustálený stav platí pro stejnosměrný cize buzený motor rovnice:

$$U_a = R_a I_a + U_i \quad (3.10)$$

Moment motoru je:

$$M = k\phi I_a \quad (3.11)$$

Indukované napětí motoru:

$$U_i = k\phi\omega \quad (3.12)$$

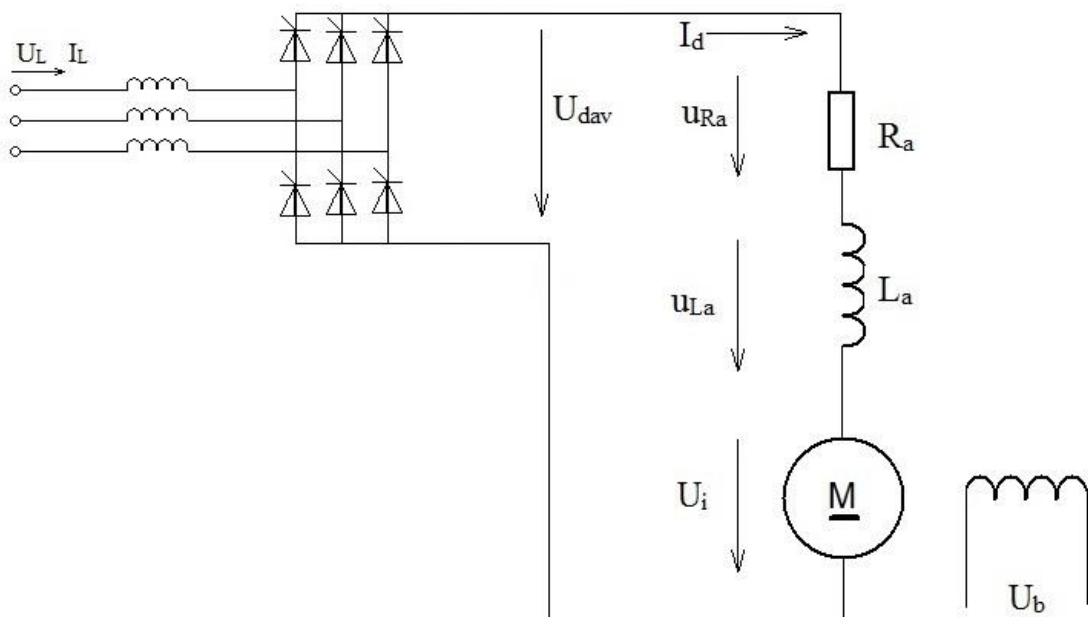
### Tyristorový usměrňovač jako řídicí měnič stejnosměrného motoru

Stejnoseměrný motor pro usměrňovač představuje aktivní zátěž. To znamená, že zátěž obsahuje zdroj energie. Takovéto usměrňovače mohou pracovat i v invertorovém neboli střídačovém režimu. U měniče v usměrňovačovém režimu je nastaven řídicí úhel tak, aby byla střední hodnota napětí usměrněného větší než hodnota indukovaného protinapětí  $U_i$ . Ve stejnosměrném meziobvodu mohou protékat jak přerušované, tak i nepřerušované proudy. V idealizovaném případě, kdy  $L$  se blíží nekonečnu, je proud vyhlazen. Na následujícím schématu 3.15. je znázorněn tyristorový usměrňovač s aktivní zátěží v podobě stejnosměrného motoru. V tomto případě je možný pouze jeden smysl proudu, ale dvě možné polarity napětí  $U_{dAV}$ .

$$U_{dAV} = R I_{dAV} + U_i \quad (3.13)$$

$$I_{dAV} = \frac{U_{dAV} - U_i}{R} \quad (3.14)$$

Reverzace se provádí postupným snižováním střední hodnoty  $U_{dAV}$  a také protinapětí  $U_i$ , a to vše při konstantním proudu. Prakticky je to zajištěno zvyšováním řídicího úhlu  $\alpha$  a snižování otáček motoru. Motor se zastaví a  $U_i = 0$ . V tuto chvíli je velikost  $U_{dAV} = R I_d$ , a úhel  $\alpha = 90^\circ$ . Motor se začne otáčet obráceně,  $U_i < 0$ , a jestliže  $\alpha = 90^\circ$ , pak bude napětí  $U_{dAV} = 0$  a pro kladný proud  $I_d$  je  $U_i = -R I_d$ . Synchronní stroj v tomto stavu funguje jako dynamo. Při  $\alpha > 90^\circ$  dochází ke změně polarity napětí a tyristory spínají tak, aby vytvářeli obvod tvořen stejnosměrným obvodem a některým ze sdružených napětí. Toto napětí má právě zápornou půlvlnu. [18]



Obr. 3.15. Tyristorový usměrňovač se stejnosměrným cize buzeným motorem

### 3.4.1. Působení poklesů napětí na pohony se stejnosměrnými motory

Stejnosemřné pohony s tyristorovými usměřňovači jsou citlivé na poklesy napětí, protože nemají ve výkonových obvodech žádný akumulátor energie, jako má například pohon s asynchronním motorem v podobě kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu. Většina stejnosměrných pohonů se vypne, pokud jedna, dvě nebo všechny tři fáze poklesnou s hodnotou napětí pod 90% jmenovitého. Každý specifický případ, kde je použit stejnosměrný pohon, by se měl posuzovat individuálně, protože je těžké vytvořit jednotný standart. Každá použitá součástka nebo zařízení má také jinou odolnost proti poklesům. Například elektronické řízení pohonu je schopno pracovat, jak již bylo řečeno s 90% poklesem napětí, kdežto stykače jsou schopny být v provozu až do poklesu 50% jmenovitého napětí. [20]

Vzhledem k tomu, že stejnosměrné pohony nemají jiný zásobník energie kromě vlastní setrvačnosti motoru, kdykoli dojde k poklesu napětí, motor zpomaluje v důsledku podpětí nebo nesymetrie a může dojít k odpojení pohonu. Do stejnosměrného obvodu nelze umístit libovolné velké kondenzátory paralelně se stejnosměrným motorem z následujících důvodů:

- Je-li každý tyristor otevřen, pak částečně vybitý paralelní kondenzátor způsobí, že pohon bude čerpat velký nabíjecí a zátěžný proud, tím může dojít k poškození tyristorů, nebo v lepším případě k proražení pojistky, pokud je obvod chráněn.
- Byl by omezen řídicí rozsah tyristorových usměřňovačů. Za normálního stavu při řídicím úhlu  $\alpha = 90^\circ$  je napětí  $U_{dAV} = 0$ . V případě zařazení kondenzátoru by se toto napětí nule nerovnálo a bylo by kladné. To znamená že pro  $U_{dAV} = 0$  musí být  $90^\circ < \alpha < 120^\circ$ . Celkový přijatelný rozsah řídicích úhlů se v závislosti na velikosti kondenzátoru a zatížení sníží.

Většina stejnosměrných cize buzených motorů má buzení přivedeno pomocí neřízeného cize buzeného usměřňovače. Při poklesu napětí pak klesne i usměrněné budící napětí a tím zeslábnou i pole vytvořené buzením. Jelikož časová konstanta pole na budícím vinutí je vcelku velká, po obnovení jmenovité hodnoty napětí může dojít k přepětí obvodu kotvy a tím i ke zvýšení rychlosti. Z tohoto důvodu může být kondenzátor, který je připojen paralelně k budícímu vinutí, schopný zmírnit tyto účinky. Musí se dbát na to, aby nedošlo k rezonanci tohoto obvodu. [20]



## 4. Opatření zvyšující odolnost el. pohonů vůči poklesům a přerušení napětí

Prostředky realizující zvýšení odolnosti elektrických pohonů lze rozdělit do několika kategorií. Jednou z možností je instalace dodatečných prostředků, které dokáží akumulovat energii. Další možností je úprava pohonu z hlediska konstrukce. Toto je jasně vidět například při použití napěťového pulsního usměrňovače v měniči kmitočtu místo neřízeného diodového usměrňovače. Další prostředek, který lze využít, je použití vhodného způsobu řízení. Jedná se především o pokročilé vektorové řízení nebo přímé řízení momentu.

Z hlediska omezení účinků poklesů napětí na elektrické pohony je nejlepší případ ten, že k poklesu vůbec nedojde. Toto je ideální stav, se kterým ale samozřejmě nemůžeme počítat. K omezení těchto vlivů dochází například úpravou spolupůsobení ochran nebo úpravou rozvodů. Tím se rozumí například napájení důležitých zařízení samostatným vedením, nebo jedno zařízení napájet paralelně ze dvou vedení. Jsou to prostředky, které však nelze realizovat ve velkém množství případů. [21]

### 4.1. Prostředky akumulující energii

Jedná se o zařízení, která dodávají v případě poklesu nebo přerušení napětí energii zátěži. Způsob skladování energie je různý. Jedním z aspektů při zavedení takového zařízení je i cena. Proto se tyto prostředky využívají zvláště u pohonů, kde je nutné zachování napájecího napětí po dobu od několika sekund případně až po hodiny.

#### 4.1.1. Akumulátorové baterie

Baterie se používají pro napájení většinou stejnosměrných zátěží. V případech, kdy je potřeba napájet střídavé zátěže, je nutno baterie doplnit o střídače. Baterie bez dalších elektronických zařízení se v pohonech nevyužívají a slouží především k napájení například nouzového osvětlení. Doba nabíjení baterie obvykle velmi překračuje dobu vybíjení. Při návrhu takovýchto záložních zdrojů by se mělo počítat s maximálně 6 hodinami nabíjení při maximálním vybití baterie. [22]

#### 4.1.2. Zdroje nepřerušovaného napájení UPS

Systémy nepřerušitelného napájení UPS se využívají v případech, kdy je nutné při poklesu napětí nebo přerušení napětí dodávat zátěži elektrickou energii. V některých případech je nutné mimo dodávky energie zajistit i kvalitu této energie. Z tohoto vyplývá, že UPS lze využít i jako zdroj kvalitní elektrické energie pro elektrické pohony, avšak samozřejmě na omezenou dobu. UPS jsou v dnešní době dostupné ve výkonostním pásmu jmenovitého výkonu od 200VA do 50kVA pro jednofázové a od 10kVA do 4000kVA pro třífázové soustavy. Ztráty se pohybují od 3% do 10%. Tyto hodnoty závisí na počtu měničů, které UPS obsahuje a také na typu sekundární baterie. [22]

UPS mohou mít tedy tyto funkce:

- Dodávka elektrické energie během krátkodobého poklesu napětí
- Dodávka elektrické energie během přerušování napětí
- Vyrovnání napěťové špičky. Krátkodobé přepětí lze omezit, i když je více jak 10%  $U_N$
- Zvýšení i snížení napětí během dlouhodobého podpětí / přepětí
- Snížení rušení v síti
- Vyrovnání frekvence při její změně v napájecí soustavě
- Zabránění přenosu harmonického zkreslení přes UPS
- Zabránění přenosu napěťových rázů do spotřebiče [21]

Podle normy EN 50091-3 lze UPS rozdělit na tři třídy. Podle tříd je vidět i závislost výstupního napětí a výstupní frekvence na vstupních hodnotách.

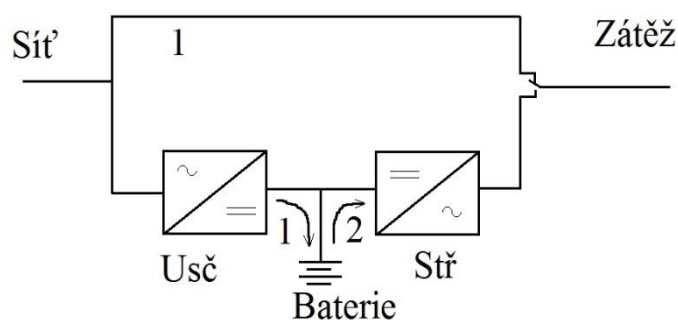
Jsou to tedy tři třídy:

- VFD – Výstupní napětí a frekvence jsou závislé na dodávce z hlavního napáječe
- VI – Výstupní napětí je nezávislé na dodávce z hlavního napáječe
- VFI – Výstupní napětí a frekvence jsou nezávislé na dodávce z hlavního napáječe

V praxi se tyto tři třídy označují také jako pasivní záloha, interaktivní vedení a poslední jako dvojitá konverze. [22]

#### Pasivní zálohové zdroje VFD

Tyto UPS jsou nejjednodušší a také nejlevnější zdroje dodávky elektrické energie v době výpadku napájení. S jednoduchostí a nízkou cenou jdou ale ruku v ruce také některé závažné nevýhody. Zátěž je v normálním provozu vystavena rušení z napájecí sítě. Dále není poskytnuta žádná regulace napětí či frekvence. Pro tento typ UPS jsou charakteristické dva pracovní režimy. První je normální provozní stav, kdy síť dodává energii o jmenovitých hodnotách. V tomto případě je zátěž napájena přímo ze sítě a baterie se nabíjí po usměrnění v usměrňovači. Druhý provozní stav nastane, když dojde k výpadku energie. Zátěž se odepne přímo od sítě pomocí spínače a je napájena ze střídače, kterému dodává energii baterie.

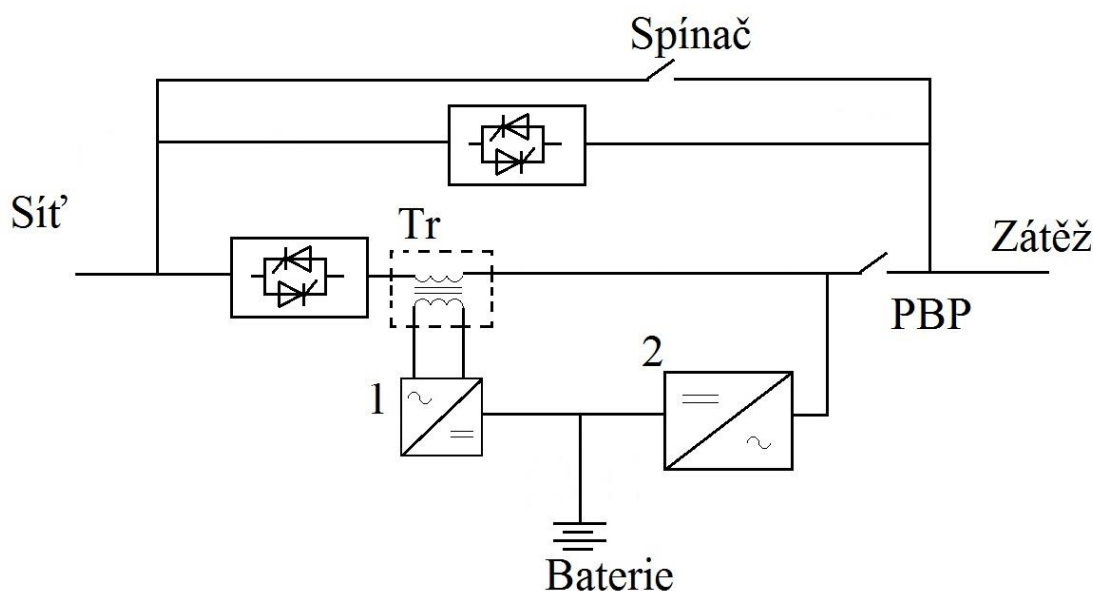


4.1. Princip pasivního zálohového zdroje VDF

Maximální výdrž baterií by měla být 3 hodiny oproti 6 hodinám nabíjení. Jednou z největších nevýhod tohoto typu UPS je, že není nulová doba přechodu pro napájení z baterie. Což znamená, že dojde ke krátkému přerušení napětí cca 5 až 20 ms, a proto nelze toto zařízení použít u zvláště citlivých spotřebičů na výpadky napětí. [21] [22]

### Interaktivní vedení VI

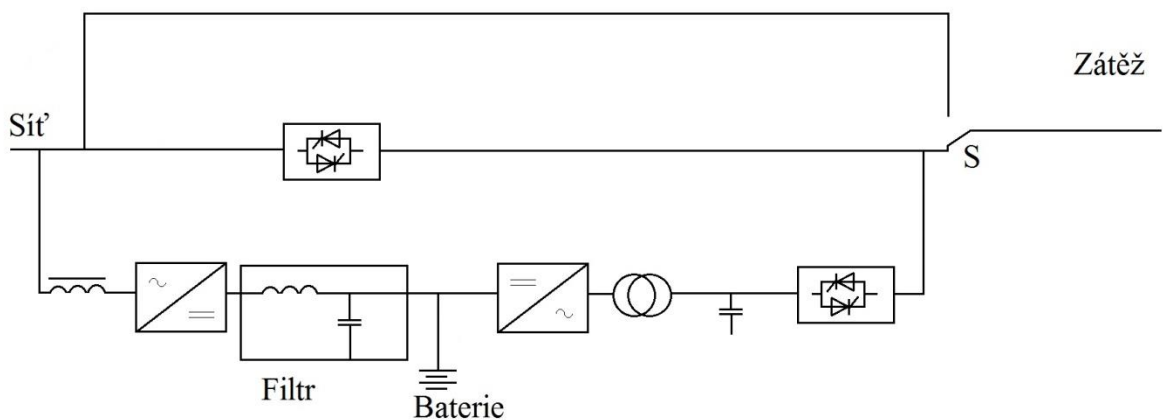
Tento typ je oproti předchozímu vybaven i korekcí napětí. O to se stará takzvané Delta schéma. Na obr. 4.2. je zobrazeno Delta schéma UPS, které je vybaveno DC / AC měniči. Ve schématu je vyznačeno (1) delta inverter a (2) hlavní inverter. Mezi těmito měniči je umístěna sekundární baterie. Delta inverter je připojen na sekundárním vinutí transformátoru. Primární vinutí tohoto transformátoru je sériově připojeno mezi sítí a výstupem UPS. PBP je bod rovnováhy elektrické energie a v tomto bodě hlavní inverter řídí velikost a tvar výstupního napětí. Na primárním vinutí transformátoru  $Tr$  je napětí, které je výsledným napětím z rozdílu mezi skutečným na vstupu UPS ze sítě a vázaným napětím v bodě rovnováhy elektrické energie. Napětí na primárním vinutí reguluje napětí na sekundárním vinutí, kde je připojen delta inverter. Za normálního stavu, kdy je napájecí napětí stejné jako na PBP, je napětí na primáru transformátoru nulové a zátěž je napájena ze sítě. V případě, pokud je napájecí napětí nižší než v PBP, na primárním vinutí transformátoru je již nenulové napětí. Hlavní inverter dodává přídatný proud. Delta inverter zvyšuje napětí na primárním vinutí tím, že generuje proud v sekundárním transformátorovém vinutí. Poté je ze sítě odebírán vyšší proud, aby bylo ze sítě možno získat 100% výkonu i při nižším napětí. Tímto způsobem tedy funguje regulace napětí i při jeho poklesu. Při výpadku napájení lze samozřejmě jako v předchozím případě napájet zátěž pouze z baterie a hlavní inverter funguje jako střídač. [22]



Obr. 4.2. Blokové schéma interaktivního vedení VI

## Dvojitá konverze VFI

Dvojitá konverze funguje tak, že v normálním režimu se vstupním napětím dobíjí baterie a z té přes měnič vystupuje napětí, které je na zátěži. Někdy se také nazývá on-line zařízení. Je to tedy kombinace usměrňovač, nabíjení, střídač. Baterie je tedy nepřetržitě napájena. V režimu poklesu nebo přerušení napájecího napětí dojde k tomu, že baterie není nabíjena. Jedná se tedy o okamžitou dodávku, bez žádných časových prodlev. V případě poruchy UPS lze zátěž napájet přes paralelní propojení neboli bočník. Dvojitá konverze tedy dokáže regulovat napětí i výstupní frekvenci, a je schopna potlačit některé nepříznivé vlivy ze sítě. Používá se proto u nejcitlivějších zařízení, které jsou velmi náročné na stálou a kvalitní dodávku elektrické energie. [21][22]



Obr. 4.3. Schéma dvojité konverze VFI

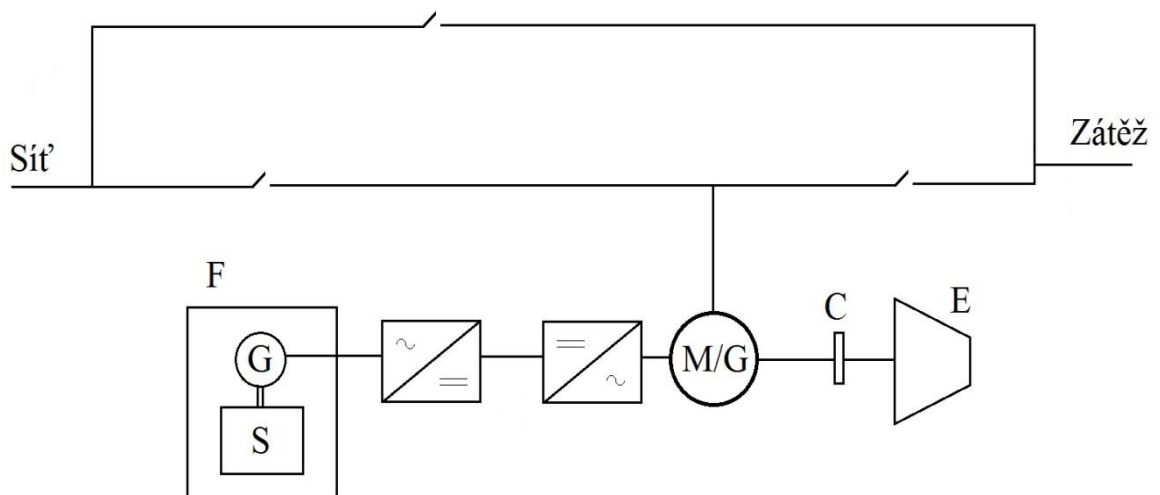
### 4.1.3. Setrvačníky

Setrvačníky používáme jako zdroj energie při výpadku nebo poklesu napětí. Při normálním bezporuchovém stavu je setrvačnick „nabíjen“ hlavním pohonem. Setrvačnicku je tedy udržována potřebná kinetická energie udržováním rotující rychlosti. V době, kdy dojde k výpadku nebo poklesu napětí, je energie setrvačnicku využita k přeměně na elektrickou energii pomocí polovodičových měničů. Setrvačnicku mohou dodávat energii po omezenou dobu, to znamená, že je vhodné setrvačnicku použít k pokrytí krátkých poklesů napětí. Setrvačnicku lze rozdělit na dva hlavní druhy:

- Nízkorychlostní setrvačnicku (LSFW), otáčky až do 6 000 ot./min.  
Tento typ setrvačnicku je výhodný hlavně díky ceně. Jelikož otáčky nejsou zas tak vysoké ve srovnání s druhým typem, musí mít setrvačnicku pro uchování dostatečného množství energie velký průměr. Vyráběny jsou z oceli a dosahují hodnot výkonu až v řádech MVA a jsou schopny dodávat energii až po dobu 30 sekund.

- Vysokorychlostní setrvačníky (HSWF), otáčky od 10 000 do 100 000 ot./min. Setrvačníky s velkou rychlostí jsou vyráběny ze skla nebo častěji z uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna jsou až 5x těžší než ocel. Vyšší náklady těchto typů setrvačnicků jsou spojeny s nutností zapouzdření ve vakuu. Z důvodů velmi vysokých rychlostí je nutné použít magnetická ložiska, protože v případě použití klasických ložisek by docházelo ke značnému tření. Výkony vysokorychlostních setrvačnicků se pohybují do 250 kW a dokáží uchovat energii až 8 MW.

Setrvačníky oproti bateriím nejsou náchylné na nabíjecí a vybíjecí cykly. Dále také hodnota uchované energie je 5 až 10x větší než u klasických akumulátorů. Značná úspora především vysokorychlostních setrvačnicků je také v uspořené prostoru oproti bateriím. Avšak nevýhodou je již zmíněná relativně krátká doba dodávání energie a také cena. Setrvačníky se však mohou použít společně v kombinaci s motorgenerátorem, jak je znázorněno na obr. 4.4. Tyto systémy mohou naběhnout během 5-20 sekund, což při výdrži setrvačnicku až 30 sekund je dostatečná doba. [21][22]



Obr. 4.4. Kombinovaný systém setrvačnick / motorgenerátor

V případě normálního napájení je setrvačnickový systém (F) nabíjen pomocí motorgenerátoru. Při poklesu nebo přerušení napětí setrvačnick pohání generátor, dále je energie usměrněna a následně vystřídána z důvodu zachování stejné frekvence i v případě snižujících se otáček setrvačnicku. Motorgenerátor dodává do sítě potřebnou energii. Během 5-20 sekund se aktivuje zdroj energie v podobě spalovacího motoru či turbíny (E) a ta se přes elektromagnetickou spojku připojí.

#### 4.1.4. Superkondenzátory

Superkapacity jsou využívány v elektrických pohonech zejména kvůli svému velmi rychlému nabíjecímu a vybíjecímu cyklu při velkých proudech. Kapacity uchovávají energii přímo v podobě elektrického náboje oproti ostatním druhu akumulátorů jako například setrvačnicků v podobě kinetické energie či akumulátorů v podobě chemické reakce.

Materiál vhodný pro výrobu superkondenzátorů je aktivovaný uhlík. Tím lze dosáhnout velkého povrchu elektrod, který je až 2000 m<sup>2</sup>/g. Například superkondenzátor, který má 600F/2.3V o rozměrech 4 x 6x 9 cm, váží pouze 290g. Tento kondenzátor má tedy měrný výkon vztažený k hmotnosti 100x větší než elektrolytický kondenzátor. Srovnání s klasickými kondenzátory a olověnými bateriemi je vidět v tabulce 4.1.

	olověná baterie	superkondenzátor	běžný kondenzátor
nabíjecí doba	1 – 5 h	0,3 – 30 s	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-6</sup> s
vybíjecí doba	0,3 – 3 h	0,3 – 30 s	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-6</sup> s
měrná energie [Wh/kg]	10 - 100	1 – 10	< 0,1
měrný výkon [W/kg]	< 1000	< 10 000	<100 000
životnost [cyklů]	1000	> 500 000	> 500 000
účinnost nabíjení a vybíjení [%]	70 – 85	85 –98	> 95

Tab. 4.1. Srovnání superkondenzátorů s ostatními akumulátory energie [24]

Superkondenzátory se v elektrických pohonech využívají jako akumulátor energie při rekuperaci, nebo pro dodání krátkodobého špičkového výkonu. V oblasti zdrojů energie však superkapacity můžeme využít jako zdroj energie podobně jako předchozí popsané zdroje. Jednoznačnou výhodou je rychlé nabíjení a vybíjení. Lze je tedy využít v případě krátkodobých poklesů napětí v kombinaci s akumulátorovými UPS. Akumulátory poskytují energii pouze při dlouhodobějších výpadech či poklesech, a tím se značně ušetří jejich životnost. Superkondenzátory však nemají pouze výhody. Trpí například velkým samovybíváním. V neposlední řadě je nevýhodou i jejich poměrně vysoká cena. [22] [23] [24]

#### 4.1.5. Supravodivé magnetické systémy

Tento systém využívá, jak je z názvu patrné, supravodivosti. Konkrétně supravodivé cívky, která uchovává energii v magnetickém poli. Cívka je ochlazována tekutým héliem, což je supravodivost při nízkých teplotách. Takzvané supravodiče vysokoteplotní jsou chlazeny tekutým dusíkem, avšak v dnešní době tato technologie není plně zvládnutá. V cívkách chlazených tekutým héliem protéká stejnosměrný proud a ten vytváří magnetické pole. Ztráty způsobené průchodem proudu jsou zanedbatelné. Energií získáme otevíráním a uzavíráním obvodu pomocí polovodičového spínače. Cívka se chová jako zdroj proudu, kterým můžeme nabíjet kondenzátory, ze kterých pak získáme stejnosměrné napětí, které následně můžeme v napěťovém střídači převést na střídavé napětí potřebných parametrů. Výkony těchto systémů mohou být od 1 až do 100 MW, avšak po dobu 0,1-1 sekundy. [22]

#### 4.1.6. Energie ze stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch lze využít jako zdroj energie. V principu je tento způsob podobný jako v případě uchování energie pomocí setrvačnicku. Kompresor, který je za normálních podmínek napájen ze sítě, udržuje pod tlakem zásobník vzduchu. V případě potřeby získání energie tento stlačený vzduch může pohánět turbínu, která následně pohání motorgenerátor. Výkony těchto systémů jsou v řádu stovek kVA. [22]

## 4.2. Zvýšení odolnosti pohonu pomocí polovodičových prvků

Odolnost elektrického pohonu lze zvýšit pomocí konstrukce samotného pohonu. Jak již bylo řečeno na začátku této kapitoly, odolnost zvýšíme například tím, že použijeme jiný druh usměrňovače, který je proti poklesům odolnější. Dále můžeme do topologie pohonu přidat další prvek, který zajistí také vyšší odolnost. Tyto prvky jsou obvykle polovodičová zařízení, která různě upravují hodnotu napětí.

### 4.2.1. DVR - dynamický napěťový regulátor

DVR, někdy také nazýván dynamický obnovovač napětí je v podstatě aktivní filtr napěťového typu. Funkce je tedy taková, že v případě poklesu se napětí dorovná pomocí zvyšovacího transformátoru, jenž je připojen do série se zdrojem. Zátěž v tomto případě není napájena zcela z jiného zdroje, jak tomu bylo v předchozích případech, ale je stále napájena ze sítě. K napětí ze sítě, které kleslo na nižší hodnotu než jmenovitou, je pomocí DVR vypočítávána ztracená část napěťové křivky. DVR poté velmi rychle dorovná tuto ztracenou část křivky. Jelikož je DVR vlastně aktivní filtr, má kromě zvýšení odolnosti vůči napěťovým poklesům ještě další funkce, které lze kombinovat:

#### Paralelní filtry

- Filtrace harmonických proudů nižšího řádu
- Selektivní kompenzace zvolených harmonických proudů
- Úplná kompenzace jalového výkonu
- Kombinovaná kompenzace s použitím aktivního filtru a statického kompenzátoru
- Vyvážení nesymetrie zátěže

#### Sériové filtry

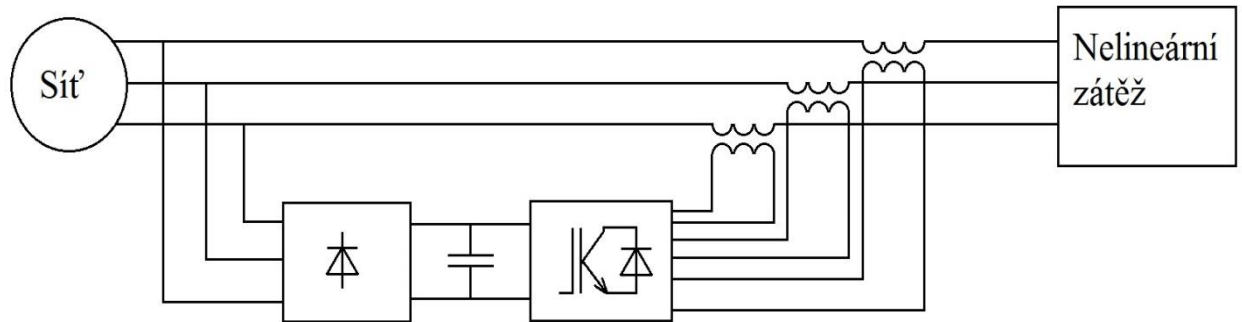
- Snížení harmonických napětí
- Regulace základní harmonické napětí
- Vyrovnání krátkodobých poklesů napětí

Linkové kondicionéry jsou to právě zařízení, která kompenzují nežádoucí odchylky napětí a mají další funkce:

- Stabilizují a upravují odchylky od jmenovitého napětí
- Eliminují přerušování a výrazné poklesy napětí
- Snižují flickr
- Zajišťují symetrii třífázové soustavy
- Snižují obsah harmonických kmitočtů
- Umožňují odstranit deformační výkon

Každé provedení dokáže omezit nežádoucí parametry jiným způsobem. Zařízení může být složité a kombinovat v sobě všechny tyto požadavky. [21] [25]

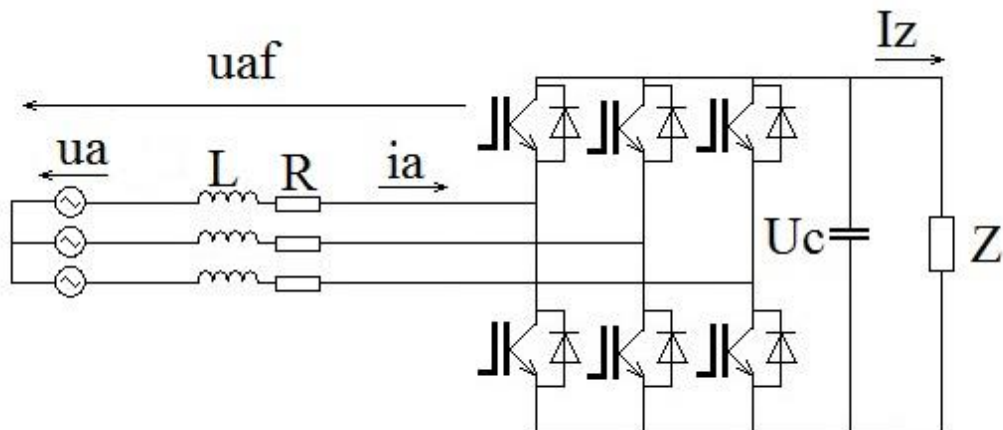
DVR lze rozdělit také podle toho, odkud čerpá energii pro vyrovnání napěťové křivky. Bez akumulované energie jsou DVR připojeny na síť a odtud tedy berou energii. V případě poklesu však pro vyrovnání napětí síť více proudově zatěžují. Další typ má pro akumulaci energie kondenzátorové baterie a je vhodnější pro vyšší výkony. Na obrázku 4.5. je zobrazen sériový aktivní filtr, neboli v případě hlavní funkce vyrovnání napětí se nazývá linkový kondicionér. [21] [25]



Obr. 4.5. Sériový aktivní filtr – linkový kondicionér

#### 4.2.2. Zvýšení odolnosti pomocí napěťových pulzních usměrňovačů

Tento typ usměrňovačů se používá ve spojení s napěťovými střídači jako měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem. Na výstupu, kde je usměrněné napětí, je připojen kondenzátor, kde se udržuje konstantní napětí. Vhodným spínáním tranzistorů dosáhneme skoro sinusového odběru proudu a také odběr proudu první harmonické má účinník blízko k jedné. Dále lze pomocí pulsního usměrňovače rekuperovat.

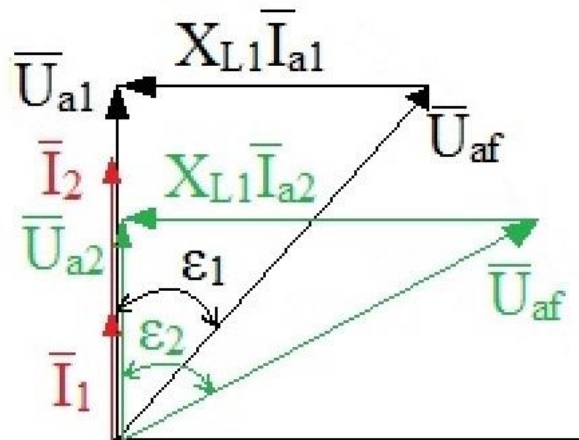


Obr. 4.6. Blokové schéma napěťového pulsního usměrňovače

Pro zjednodušení je jako zátěž místo střídače v obrázku zakreslena impedance, ale pro vysvětlení funkce stabilizace napětí to nemá zásadní vliv. Dále jsou uvažovány konstantní zátěž motoru (tedy proud impedancí je neměnný), Napětí na kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu je také konstantní.



Z obrázku 4.6. sestojíme fázorový diagram, který je na obrázku 4.7.



Obr. 4.7. Fázorový diagram pulzního usměrňovače

Z fázorového diagramu je vidět princip stabilizace napětí pomocí pulzního usměrňovače. Vychází se z toho, že napětí  $U_c$  zůstane konstantní. Toho se dosáhne tím, že při změně napájecího napětí, v tomto případě při jeho poklesu, se musí změnit velikost úbytku na reaktanci  $X_L$ . Velikost úbytku se změní tím, že pro zachování stejného výkonu musí protékat usměrňovačem větší proud. Dojde tedy k „většímu otevření“ měniče. Souběžně se změnou proudu se změní i velikost úhlu  $\varepsilon$ . Abychom využili dobré vlastnosti pulzního usměrňovače, lze jej použít pro poklesy napětí o 1/3 jmenovitého napětí. V případě větších poklesů je nutné kombinovat s ostatními způsoby používanými pro zvýšení odolnosti. [21] [27]

#### 4.2.3. Zvýšení odolnosti použitím pulzního měniče v meziobvodu

Tento způsob zvýšení odolnosti spočívá v umístění zvyšovacího pulzního měniče do stejnosměrného meziobvodu nepřímého měniče kmitočtu. Je to specifický způsob, který bude podrobněji popsán v 5. kapitole, protože právě tento měnič byl použit při laboratorním měření.

#### 4.3. Zvýšení odolnosti pohonů pomocí řízení střídače

Pomocí správného řízení střídače lze zvýšit odolnost pohonu, nebo dokonce zcela eliminovat důsledky poklesu napětí. Pokročilé řízení střídačů se provádí jednak vektorovým řízením, nebo přímým řízením momentu. Oba tyto druhy řízení jsou ekvivalentní.

## Vektorové řízení asynchronního motoru

Vektorové řízení je pokročilé dynamické řízení asynchronního motoru, které vychází z analogie mezi proudy v stejnosměrném motoru a rozkladem proudů v asynchronním motoru. Vektor proudu rozdělíme do dvou složek  $I_{sd}$  a  $I_{sq}$ . Složka proudu  $I_{sd}$  odpovídá momentu, tedy momentotvorná složka proudu, a  $I_{sq}$  odpovídá toku, tedy tokotvorná složka proudu. Analogie je tedy taková, že proud kotvy stejnosměrného motoru  $I_a$  odpovídá proudu  $I_{sq}$ , a dále budící proud  $I_b$  odpovídá proudu  $I_{sd}$ . Řídicí systém není jednoduchý, musí obsahovat matematický model asynchronního motoru. [21] [26]

## Přímé řízení momentu

Toto řízení je ekvivalentní k vektorovému řízení, avšak se zde nereguluje statorový proud, ale přímo moment. Provádí se dvouhodnotová regulace momentu v závislosti na okamžité poloze magnetického toku. Vhodným spínáním 3 větví střídače se zajistí požadovaná rotace magnetického toku  $\Psi_s$  po zadané křivce. [21] [26]

Pro omezení vlivu poklesu jsou využívány dva základní způsoby:

- Při poklesu se zablokují tranzistory střídače a po obnovení napětí řízení sníží nebo zcela eliminuje momentové rázy a kmity.
- V druhém případě tranzistory v měniči zablockovány nejsou, naopak střídač umožní přechod energie z motoru pro vyrovnání napětí ve stejnosměrném meziobvodu.

## Zablokování tranzistorů při poklesu napětí

K zablokování tranzistorů dojde v případě působení podpěťové ochrany. Po obnovení napětí mohou vznikat v motoru nepříznivé proudy, které jsou podobné jako proudy tekoucí synchronním motorem při špatné synchronizaci se sítí. Řízení střídače tedy může být rozděleno na 2 případy.

- Indukované napětí a řízení střídače nejsou synchronizovány, to znamená, že při obnově napětí může být indukované napětí motoru jiné než napětí střídače. V tomto případě tedy dochází k velkým nadproudům a provoz střídače je nemožný nebo alespoň omezený
- Závislé řízení střídače na indukovaném napětí. Touto synchronizací docílíme toho, že nedojde k výrazným nadproudům a momentovým rázům. Realizovat to lze několika způsoby. Měřením svorkového napětí motoru zjistíme indukované napětí, které posléze můžeme nastavit na střídači, a tím jsou obě napětí synchronizována. V dalším případě lze při blokaci tranzistorů nastavit nulový rotorový kmitočet a velikost napětí poté přizpůsobit klesajícímu magnetickému toku. Jakým způsobem přizpůsobit velikost napětí střídače, lze vypočítat. [21]

### **Využití kinetické energie motoru k dobíjení kondenzátoru**

Motor se dostává do generátorického režimu a střídač slouží jako usměrňovač, který napájí stejnosměrný meziobvod a tím nabíjí kondenzátor. Toto je možné díky řízení střídače. Umožňuje to vektorové i přímé řízení momentu. K dobíjení kondenzátoru se využívá pouze malé množství kinetické energie zátěže. S ohledem na velikost momentu zátěže a délku trvání poklesu nastávají dva stavy:

- Moment zátěže je malý, a tím pádem dochází k pozvolnému poklesu otáček. Při obnovení napětí tedy otáčky klesli jen velmi málo.
- Zátěž motoru je velká a dochází k rychlejšímu poklesu otáček než v předchozím případě. Po obnovení napětí tedy může dojít k případu, že otáčky klesli velmi nízko, nebo dokonce došlo k zastavení. V tomto případě musí řízení dbát na rozběh celé soustavy, nebo zvýšení otáček z velmi nízké hodnoty na požadovanou. [21]

## 5. Praktické měření odolnosti elektrického pohonu

Měření odolnosti elektrického pohonu lze provádět různými způsoby na různých typech elektrických pohonů. Provedené měření, které je obsahem této kapitoly, bylo provedeno v laboratoři elektrických pohonů na fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Jako typ pohonu byl použit asynchronní motor s nepřímým měničem kmitočtu.

### 5.1. Složení pohonu

Samotný měnič kmitočtu není kompaktní, není tedy v rámci jednoho zařízení, ale poskládán z následujících komponentů:

- Diodové usměrňovače 3x 400V maximální proud 30A
- Stejnoseměrný meziobvod s kondenzátory. Kondenzátory EPCOS-B43456-A5568-M jsou 2 a řazeny sériově. Kapacita jednoho 6500 $\mu$ F, 400V. V sérii tedy:

$$C = \frac{C \cdot C}{C + C} = \frac{6500 \cdot 6500}{6500 + 6500} = 3250 \mu F = 3,25 mF$$

- Velikost indukčnosti ve stejnosměrném obvodu je  $L = 10 mH$
- Napěťový střídač je řízen pomocí DSP od Texas instrument TMS 320F2812. Střídač je složen ze 4 polovodičových půlmůstků SEMIKRON SKM100GB12T4. Tři půlmůstky jsou pro napěťový střídač a jeden použit pro zvyšovací pulzní měnič.

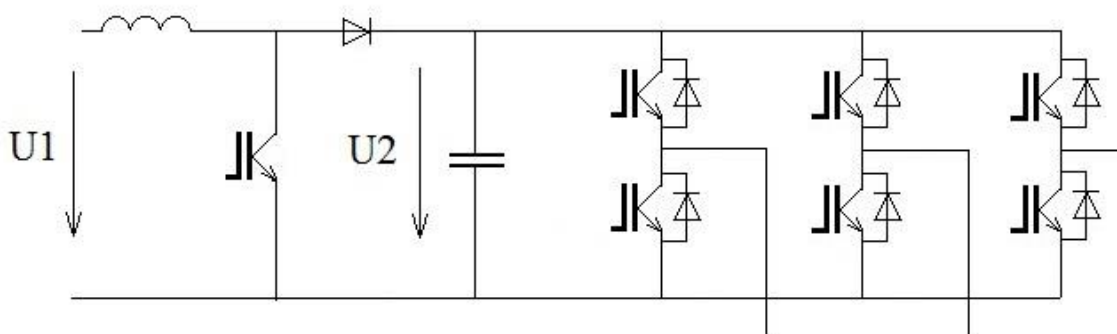
Parametry asynchronního motoru:

Třífázový asynchronní motor	Výkon	Jmenovitá otáčky	frekvence	jmenovitá napětí	jmenovitý proud	Účinnost $\cos\phi$
	3 kW	1430 ot./min.	50 Hz	380/220 V	6,7/11,6 A	0,84

Tab. 5.1. Asynchronní motor – parametry

### 5.2. Zvyšovací pulzní měnič pro zvýšení odolnosti pohonu

Tento druh ochrany proti poklesu napětí lze klasifikovat dle předchozí kapitoly jako zařízení zvyšující odolnost pomocí polovodičových prvků. Tato aplikace je specifická a běžně se v elektrických pohonech nevyskytuje. Základní schéma je na obrázku 5.1.

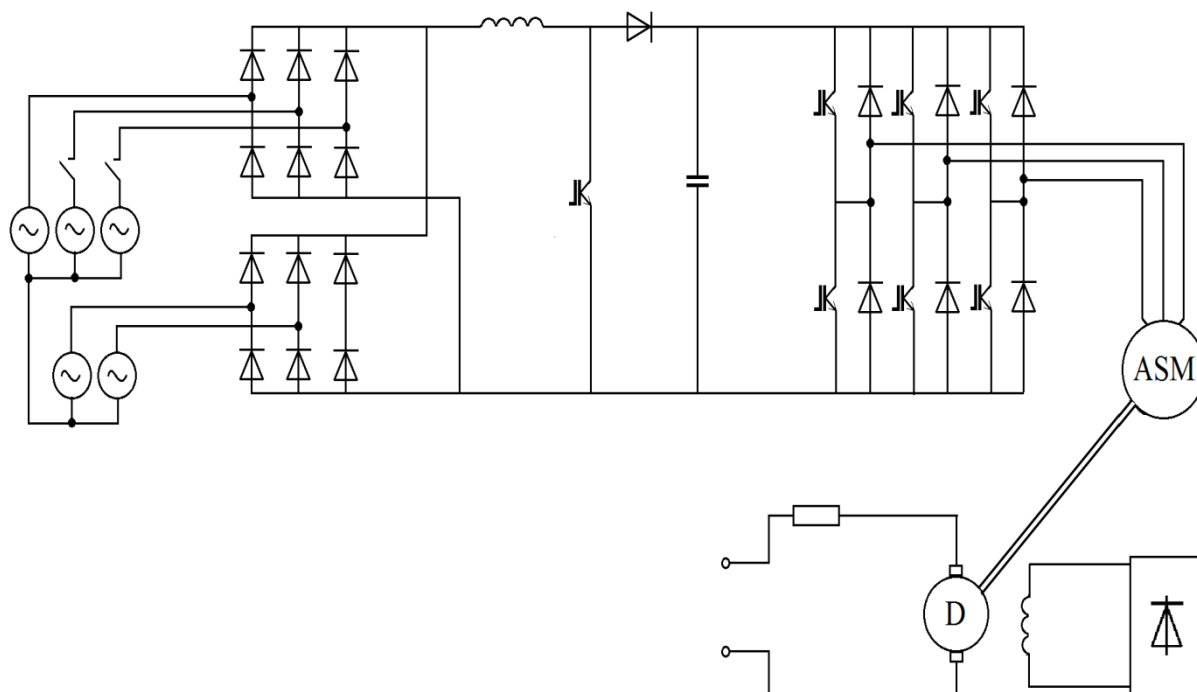


Obr. 5.1. Zvyšovací pulzní měnič ve stejnosměrném meziobvodu + napěťový střídač

Funkce je taková, že řízení pulzního měniče má nastavenou hodnotu napětí v meziobvodu, na kterou se v případě poklesu reguluje. Energií měnič získá z akumulární indukčnosti. Je-li tranzistor sepnut, dochází k rychlému nárůstu proudu v indukčnosti a po vypnutí tranzistoru se indukčnost vybíjí přes diodu do kondenzátoru a tím se na něm udržuje požadované napětí. Abychom udrželi výkon i při poklesu napětí, dochází k většímu proudovému zatížení prvků v usměrňovači a musíme s tím počítat. Indukčnost musí být navržena tak aby byla zajištěna dostatečná dynamika i dostatečné množství energie. Důležité při návrhu také je určit maximální povolený pokles napětí a také dobu do kdy se musí vyrovnat napětí na kondenzátoru. Toto řešení je více ekonomické než využití pulzního usměrňovače. Ovšem v případech kdy se nevyžaduje například rekuperace. [21] [27]

### 5.3. Schéma zapojení

Na obrázku 5.2. je schéma, které odpovídá konkrétnímu zapojení, na kterém měření proběhlo. Je zde vidět dvojice třífázových diodových usměrňovačů, napětěvý meziobvod s indukčností 10mH, zvyšovacím pulzním měničem, kondenzátorem o výsledné kapacitě 3,25mF. Na výstupu meziobvodu je třífázový napětěvý střídač, který řídí třífázový asynchronní motor o výkonu 3kW. Asynchronní motor je spojen přes hřídel se stejnosměrným motorem, který je v generátorickém režimu, tedy jako dynamo, využit k zatěžování ASM. Stejnoscímerný motor je buzen pomocí diodového usměrňovače 3x 160V, a buzení je nastaveno jako konstantní  $I_b = 1,15V, 220V$ . Dynamo je připojeno k zátěži přes odpor.



Obr. 5.2. Schéma zapojení pro měření poklesu napětí

Napájení je uskutečněno z třífázové regulované sítě při normálním stavu, tedy s jmenovitým napětím bez poklesu. V případě měření při poklesu napětí je jedna fáze, na které je plné napětí, stejně jako v předchozím případě, napájena ze sítě. Zbylé 2 fáze, na kterých dochází k poklesu napětí, jsou připojovány pomocí stykače. Stykač připojuje 2 autotransformatory, na kterých jsou nastavena snížená napětí na hodnoty cca 54%  $U_n$  a 83%  $U_n$ . Je to tedy nesouměrný dvoufázový pokles napětí.

#### 5.4. Měření

Měření bylo vyhodnoceno 8 a to pro 3 charakteristické případy při různých hodnotách.

- Měření odolnosti pohonu běžícího naprázdno
- Měření odolnosti pohonu běžícího naprázdno s regulací pomocí zvyšovacího pulzního měniče
- Měření odolnosti pohonu při zatížení s regulací pomocí zvyšovacího pulzního měniče

Pro řízení střídače je použito skalární řízení s čidlem otáček. Pro zaznamenání průběhů je použita dvojice osciloskopů Tektronix. Pro měření těchto veličin jsou použity proudové a napěťové sondy. Frekvence asynchronního motoru jsou udržovány konstantní frekvencí  $f = 40$  Hz, což je  $n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 40}{2} = 1200$  ot. / min. Pro všechna měření je udržováno:

Fáze	U[V]	V[V]	W[V]
Napětí simulující jmenovitý stav	89	89	89
Napětí při poklesu	74 (83%)	48 (53%)	89 (100%)

##### 5.4.1. Měření naprázdno bez regulace

Pohon při tomto měření nebyl zatížen a nebyla zvýšena odolnost proti poklesu napětí. V tomto případě je vidět jakým způsobem se bude pohon chovat při nesymetrickém poklesu napětí.

Hodnota na kondenzátoru v meziobvodu  $U_c = 204$  V.

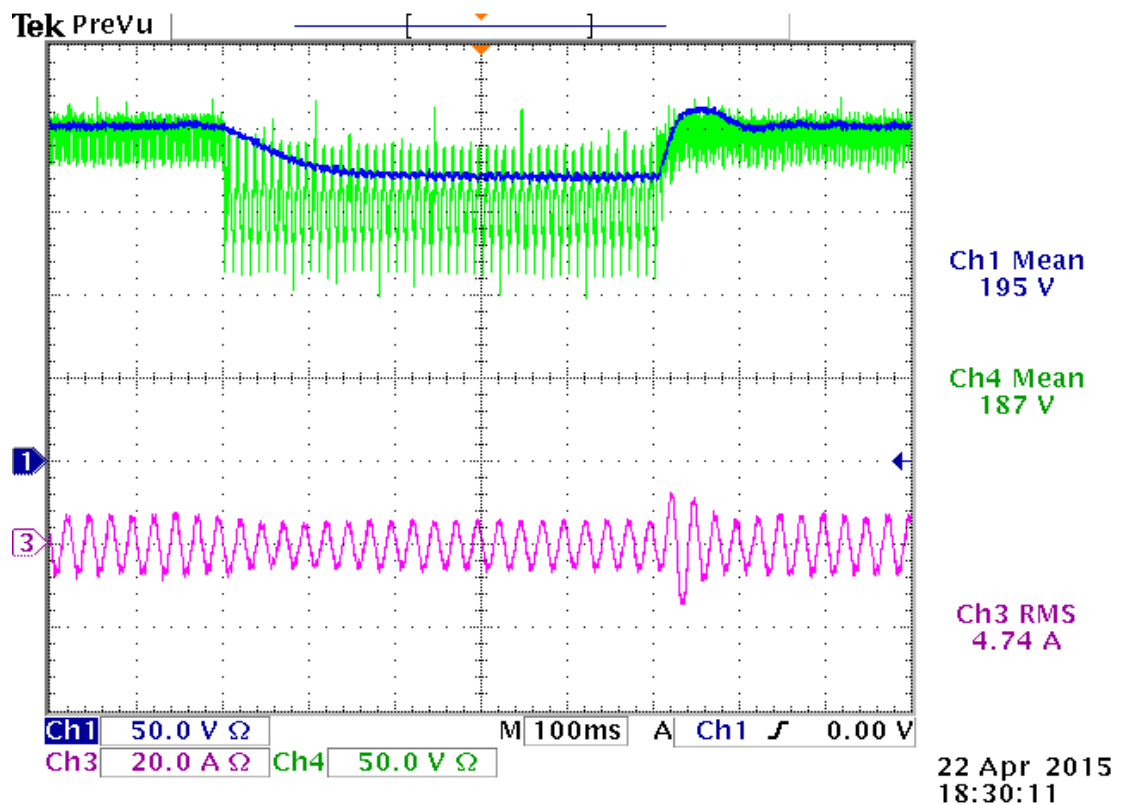
Barevné značení veličin v prvním průběhu odpovídá:

- **Modrá** – napětí na kondenzátoru  $U_c$
- **Fialová** – fázový proud motoru  $I_{mot}$
- **Zelená** – napětí v meziobvodu před indukčností  $U_a$

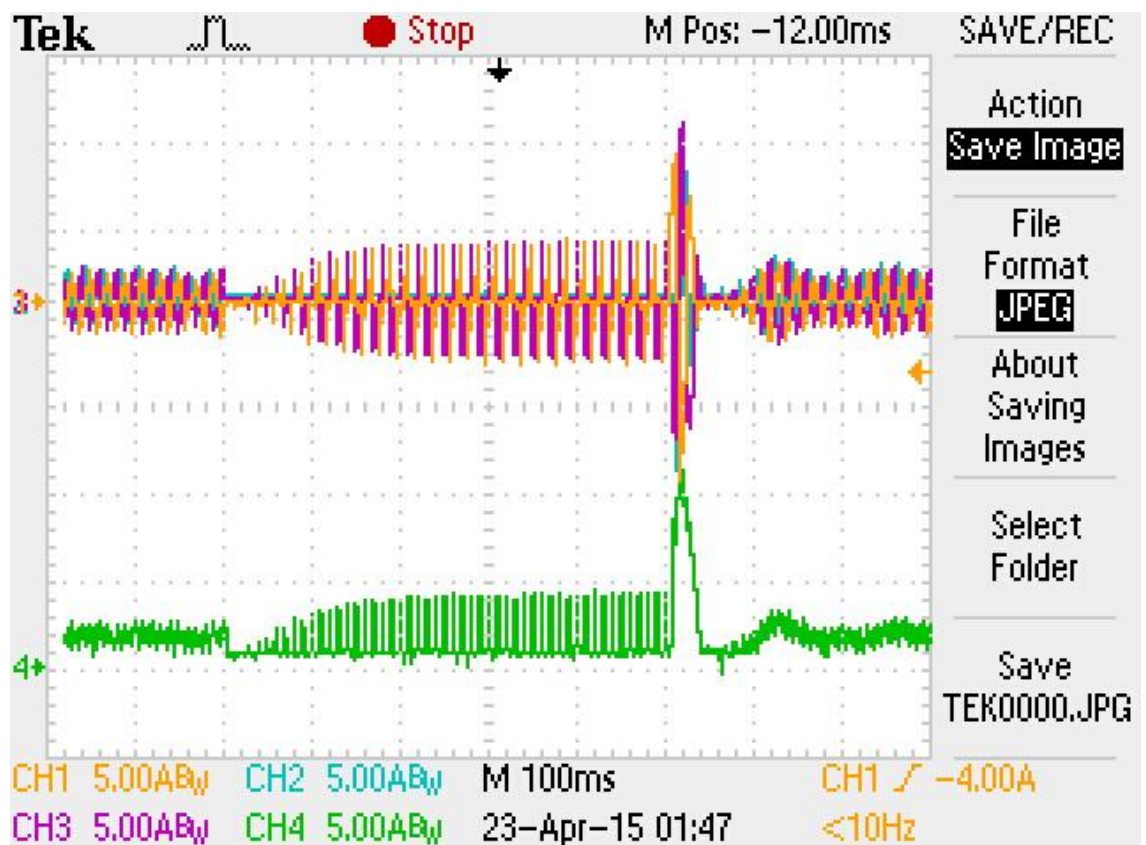
Barevné značení veličin v druhém průběhu odpovídá:

- **Žlutá** – vstupní proud  $I_2$  od napětí 74V
- **Modrá** – vstupní proud  $I_1$  od napětí 48V
- **Fialová** – vstupní proud  $I_3$  od napětí 89V
- **Zelená** – proud tekoucí stejnosměrným obvodem  $I_d$

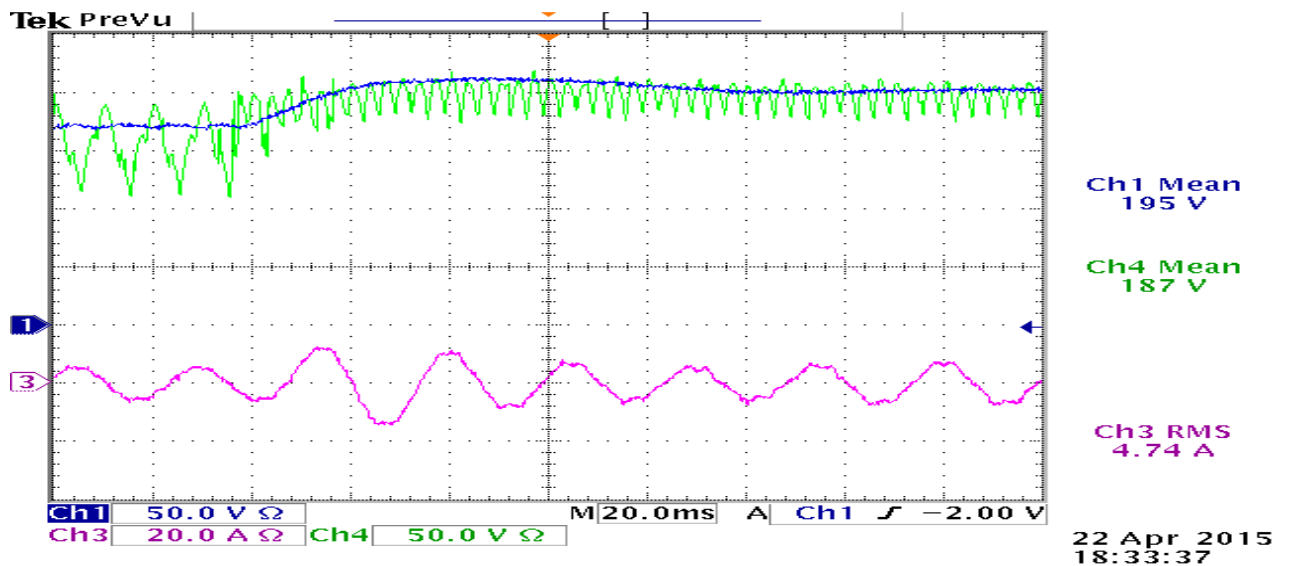
Toto barevné značení je dále zachováno pro všechna měření.



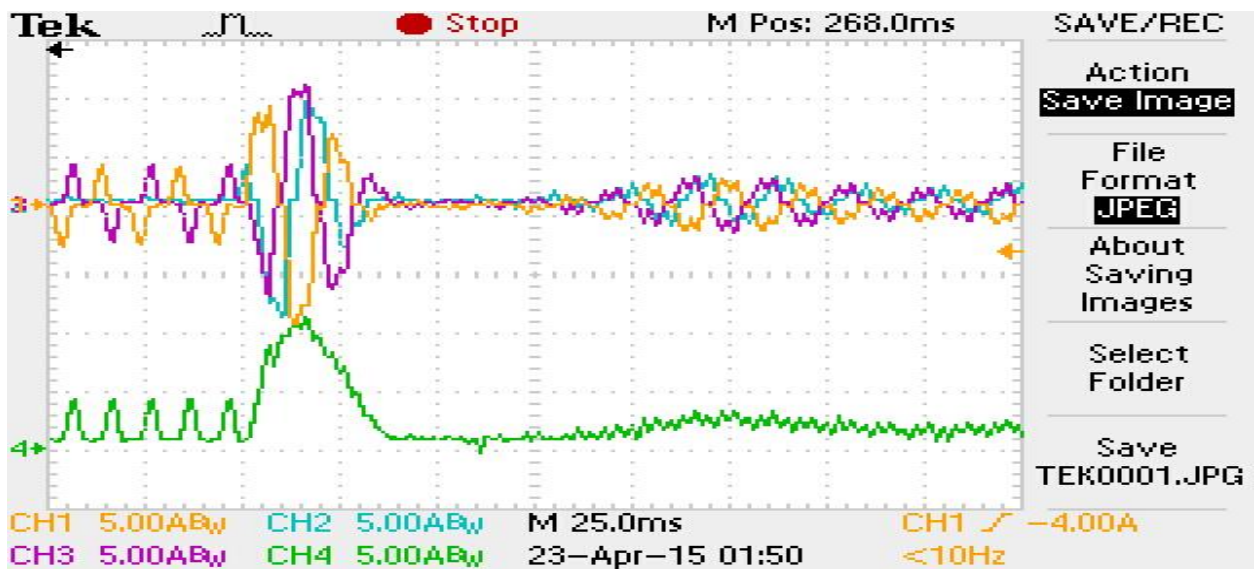
Obr. 5.3. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při chodu naprázdno bez regulace



Obr. 5.4. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při chodu naprázdno bez regulace



Obr. 5.5. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_a$  při chodu naprázdno bez regulace s přibližnou částí, kdy dojde k obnově napětí

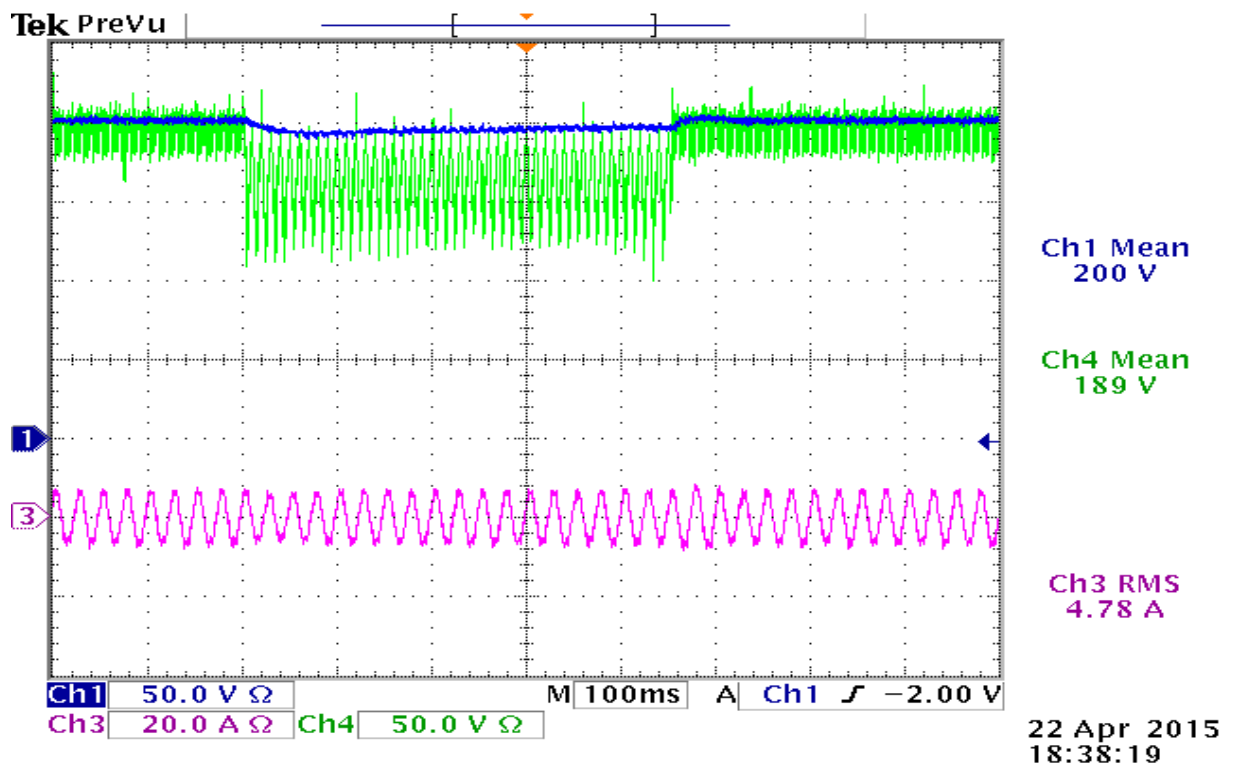


Obr. 5.6. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při chodu naprázdno bez regulace s přibližnou částí, kdy dojde k obnově napětí

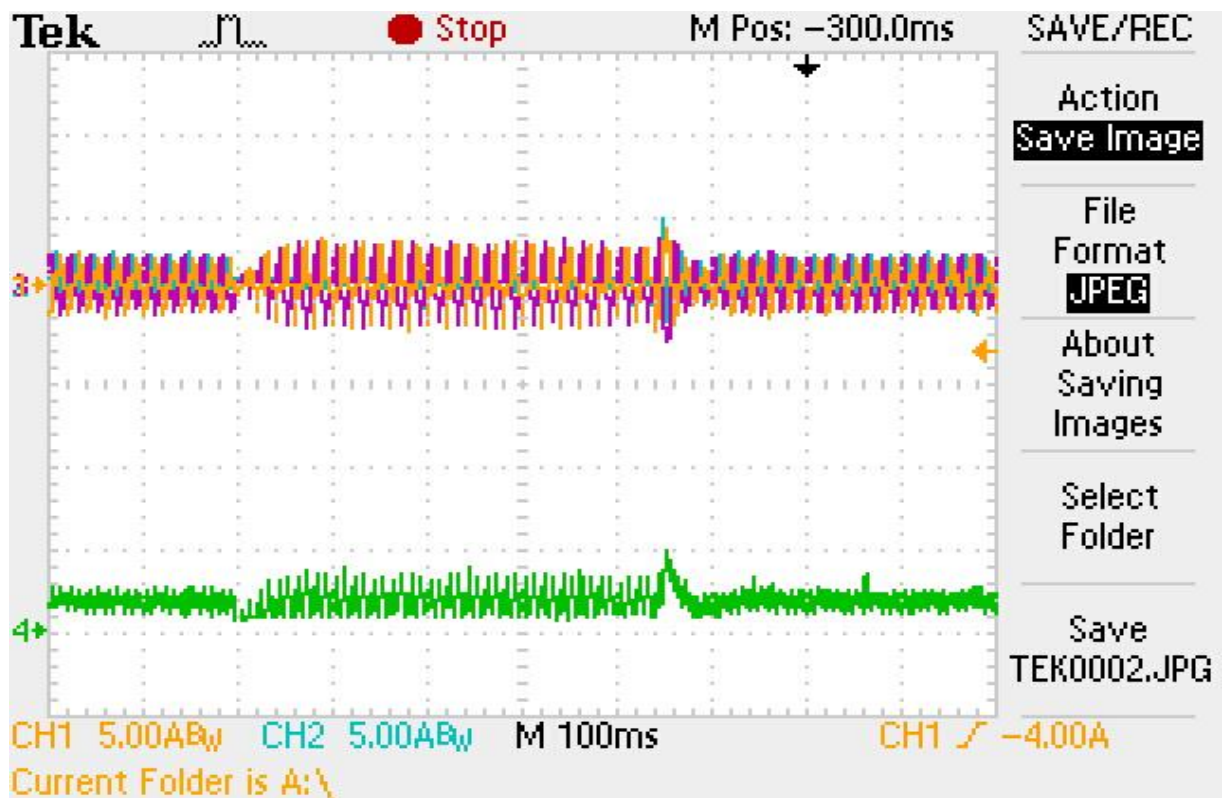
#### 5.4.2 Měření naprázdno s regulací na požadovanou hodnotu $U_{pož} = 195V$

Pohon je odolnější vůči poklesu napětí. Řízení zvyšovacího pulzního měniče je nastaveno tak, aby při poklesu udržoval napětí v meziobvodu na hodnotě  $U_{pož} = 195V$ . Parametry jsou obdobné jako v předchozím případě.

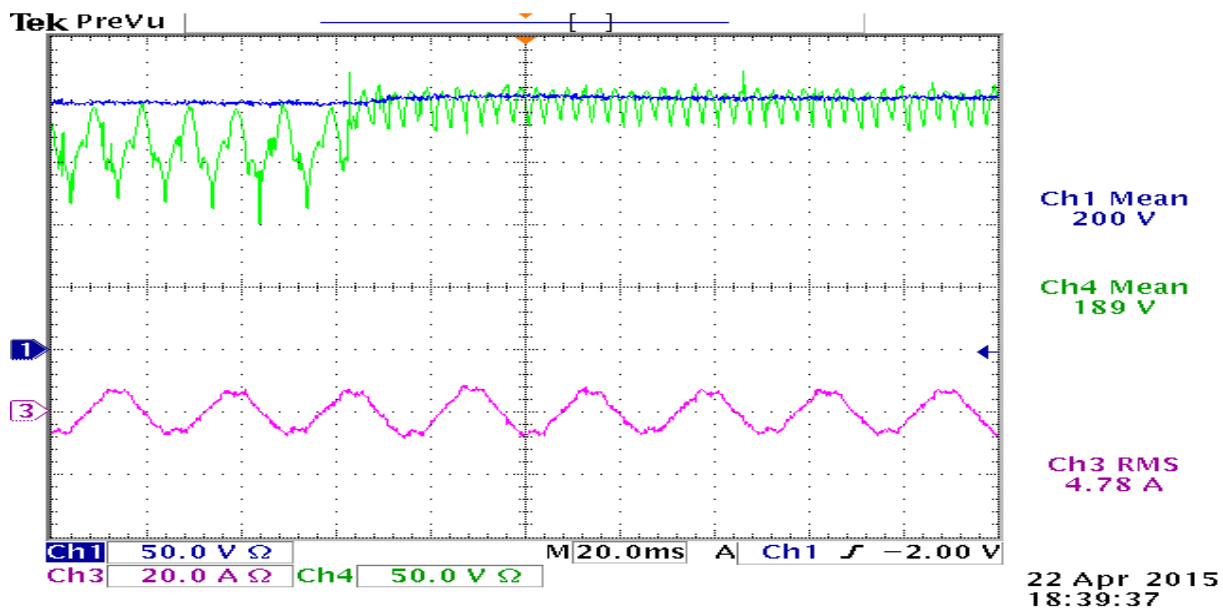




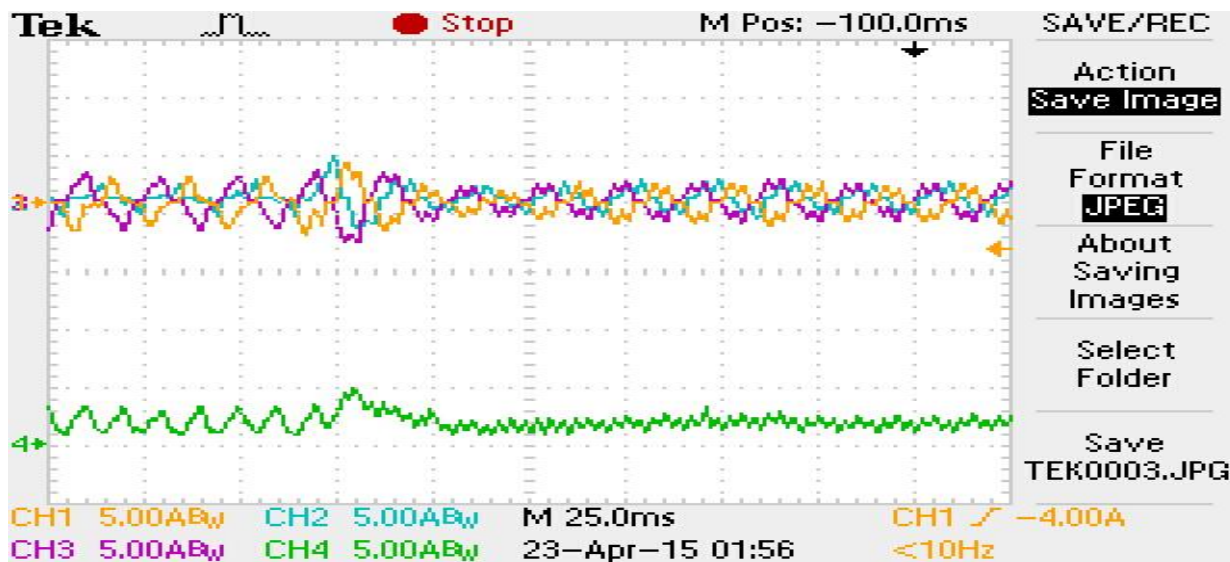
Obr. 5.7. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=195V$



Obr. 5.8. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=195V$



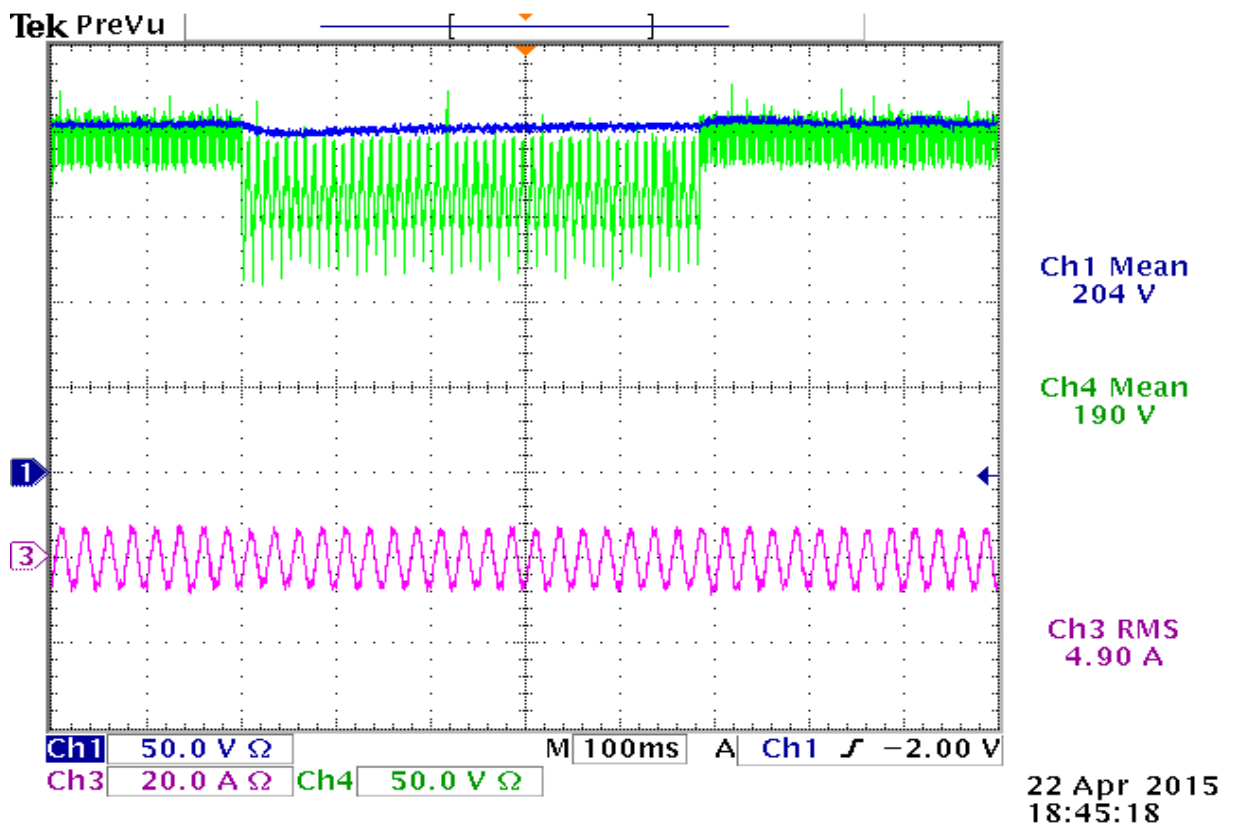
Obr. 5.9. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=195V$  s přibližnou částí, kdy dojde k obnově napětí



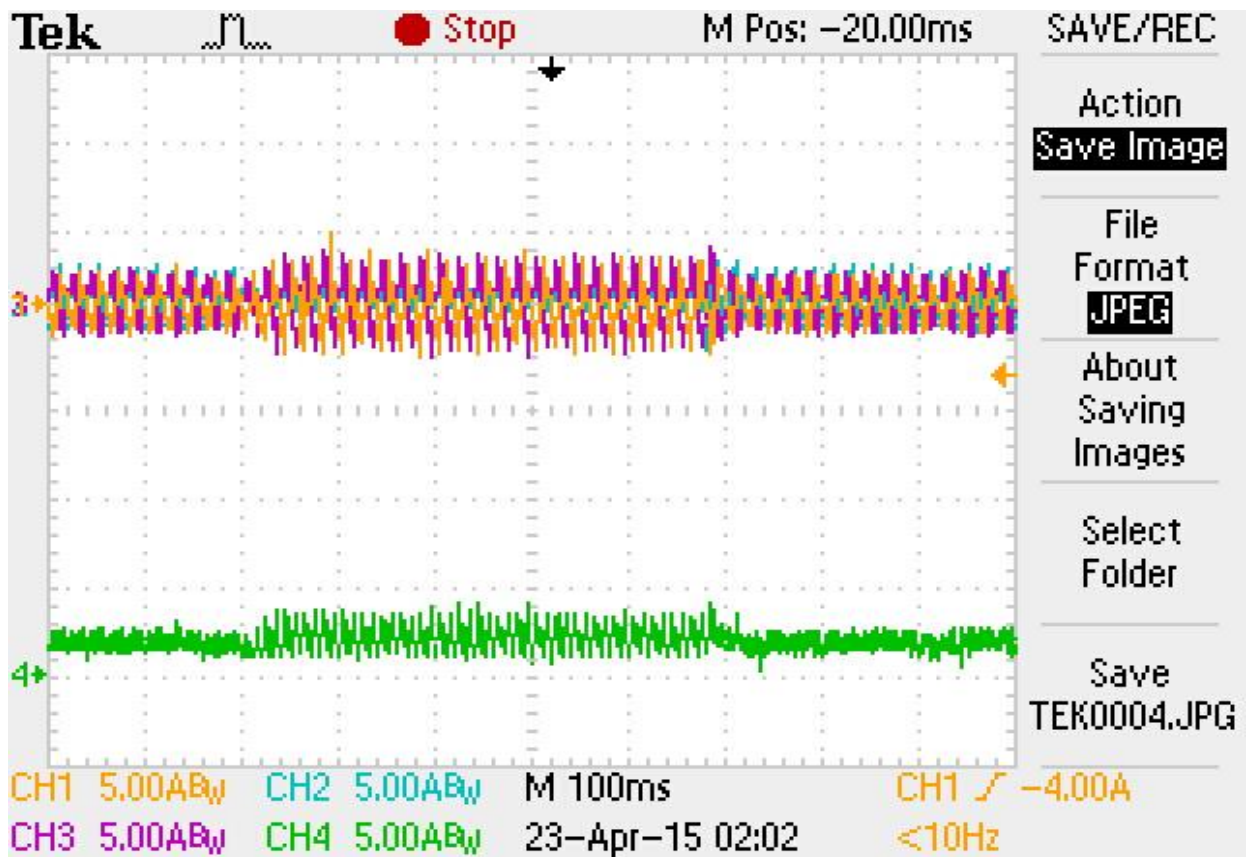
Obr. 5.10. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=195V$  s přibližnou částí, kdy dojde k obnově napětí

#### 5.4.2 Měření naprázdno s regulací na požadovanou hodnotu $U_{pož} = 200V$

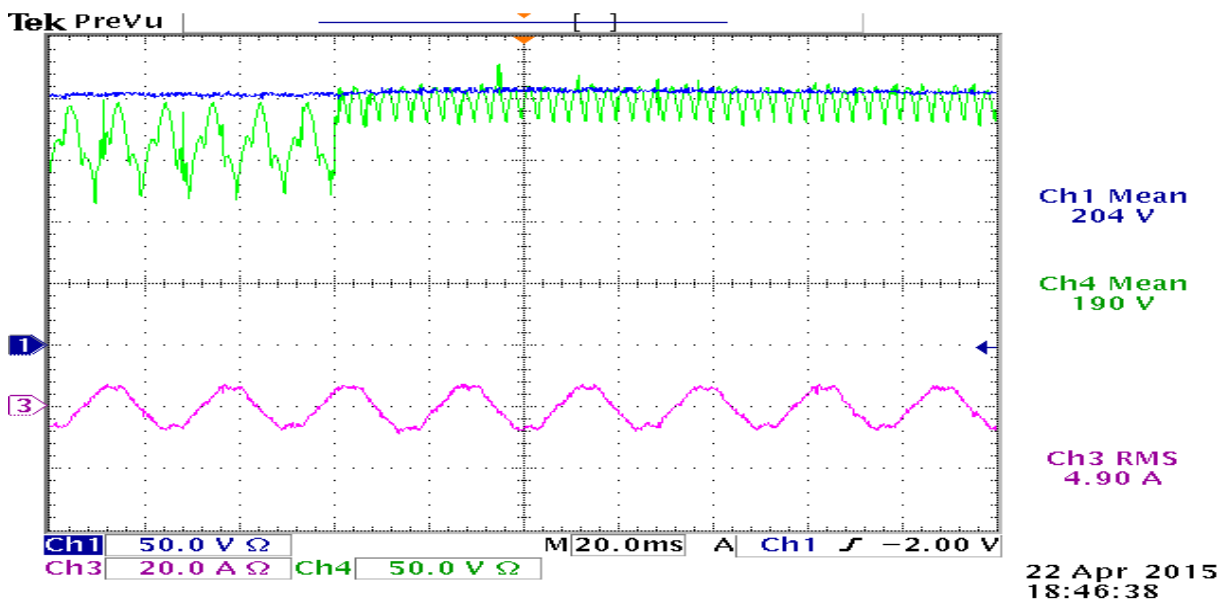
V tomto případě je řízení zvyšovacího pulzního měniče nastaveno tak, aby reguloval napětí na vyšší hodnotu než v předchozím případě. Požadovaná hodnota je  $U_{pož} = 200V$ . Ostatní parametry zůstávají stejné.



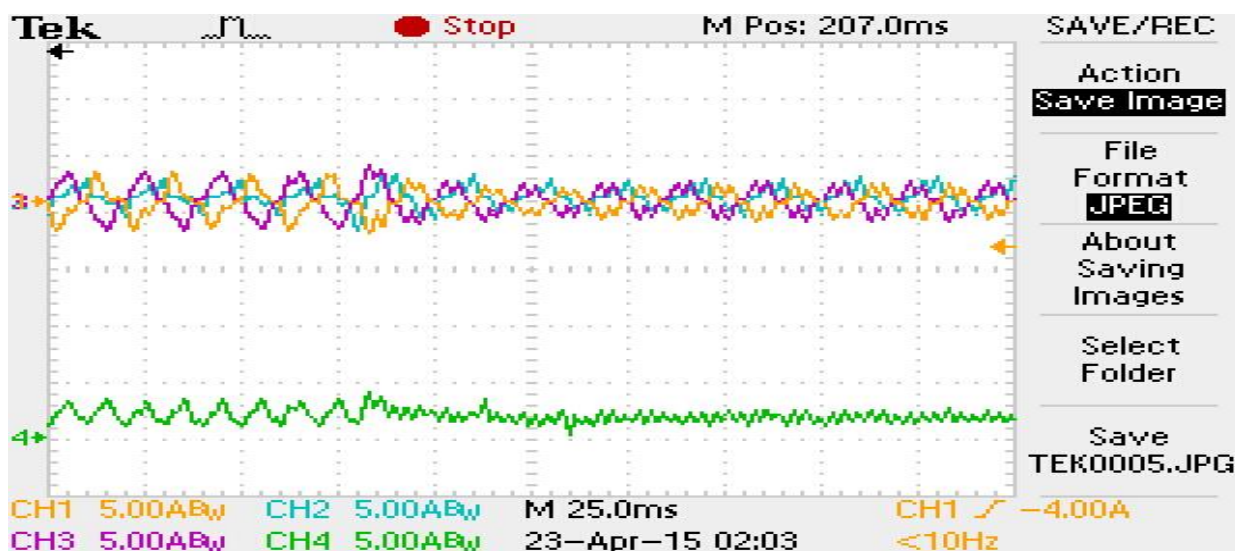
Obr. 5.11. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=200V$



Obr. 5.12. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=200V$



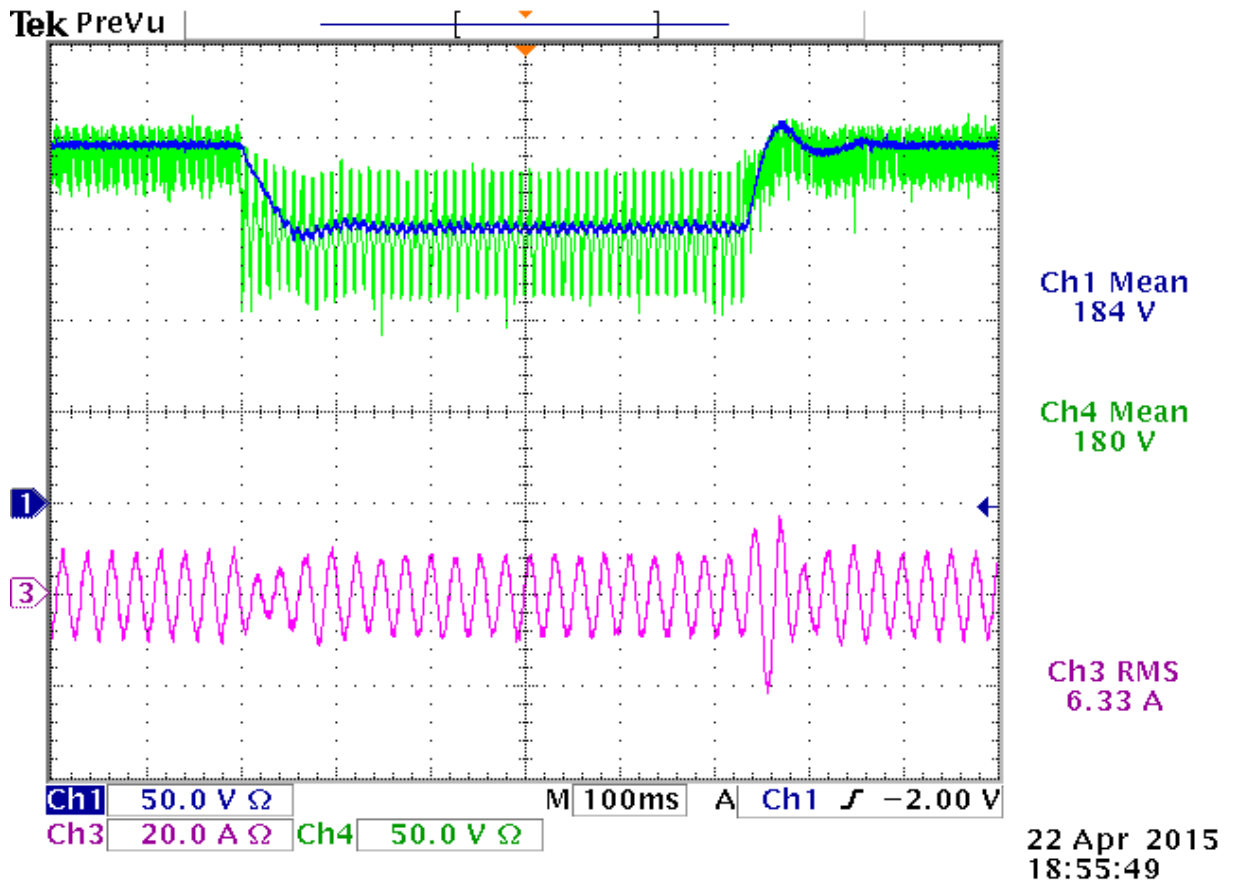
Obr. 5.13. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_a$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=200V$  s přibližnou částí, kdy dojde k obnově napětí



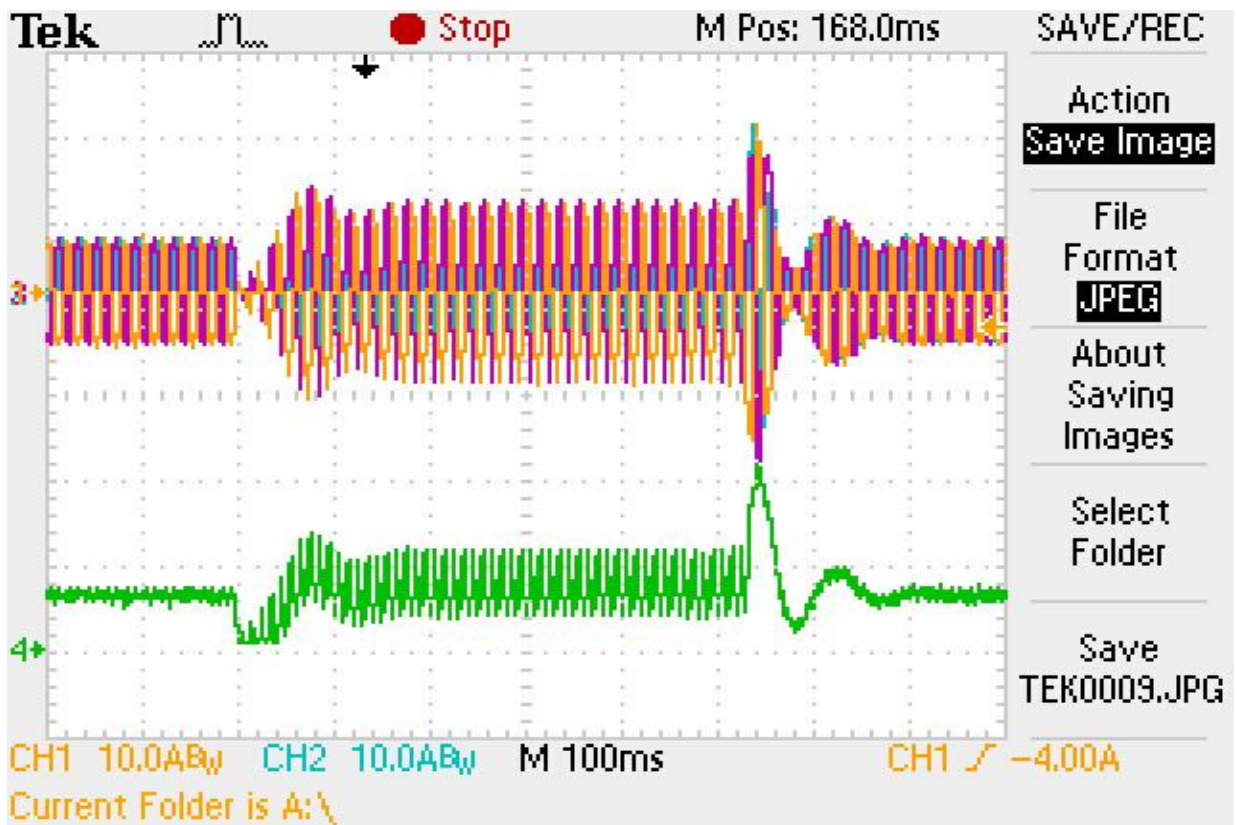
Obr. 5.14. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_a$  při chodu naprázdno s regulací na  $U_{pož}=200V$  s přibližnou částí, kdy dojde k obnově napětí

#### 5.4.4. Měření při zatížení 800W bez regulace

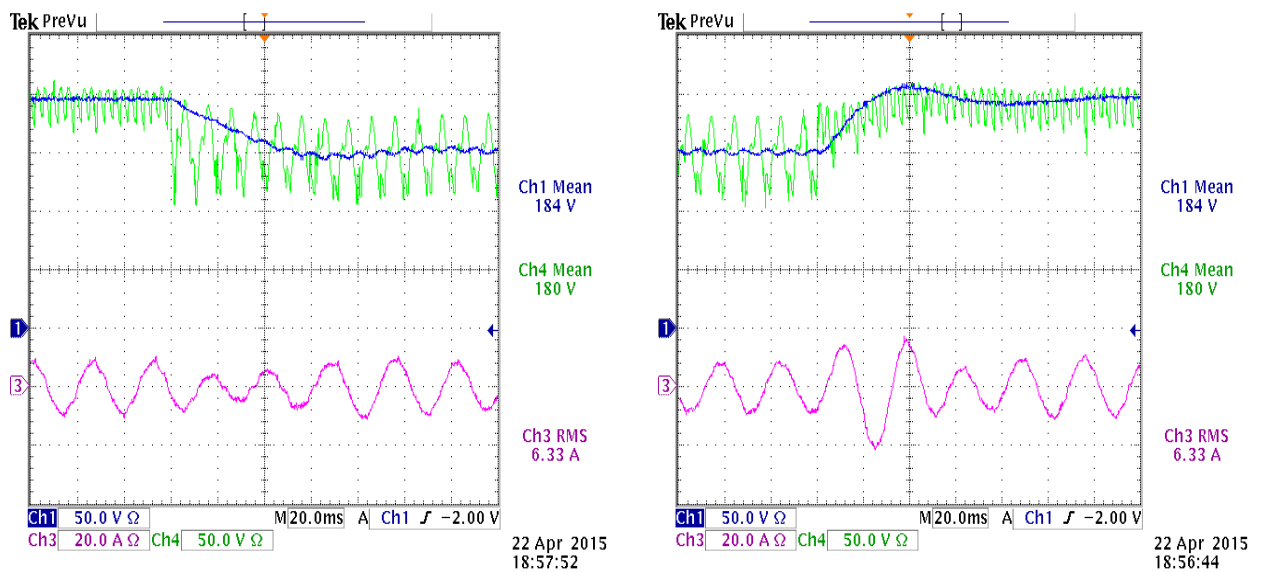
Asynchronní motor je zatížen pomocí dynama. Indukované napětí na dynamu je  $U_{idyn} = 160V$  a zatěžovací proud dynama je  $I_{dyn} = 5A$ . Asynchronní motor je tedy zatížen výkonem:  $P = U_{idyn} \cdot I_{dyn} = 160 \cdot 5 = 800W$ . Budící proud  $I_b = 1,15A$ . Napětí v meziobvodu  $U_c = 198V$ , které při se poklesu napětí snížilo na 150V.



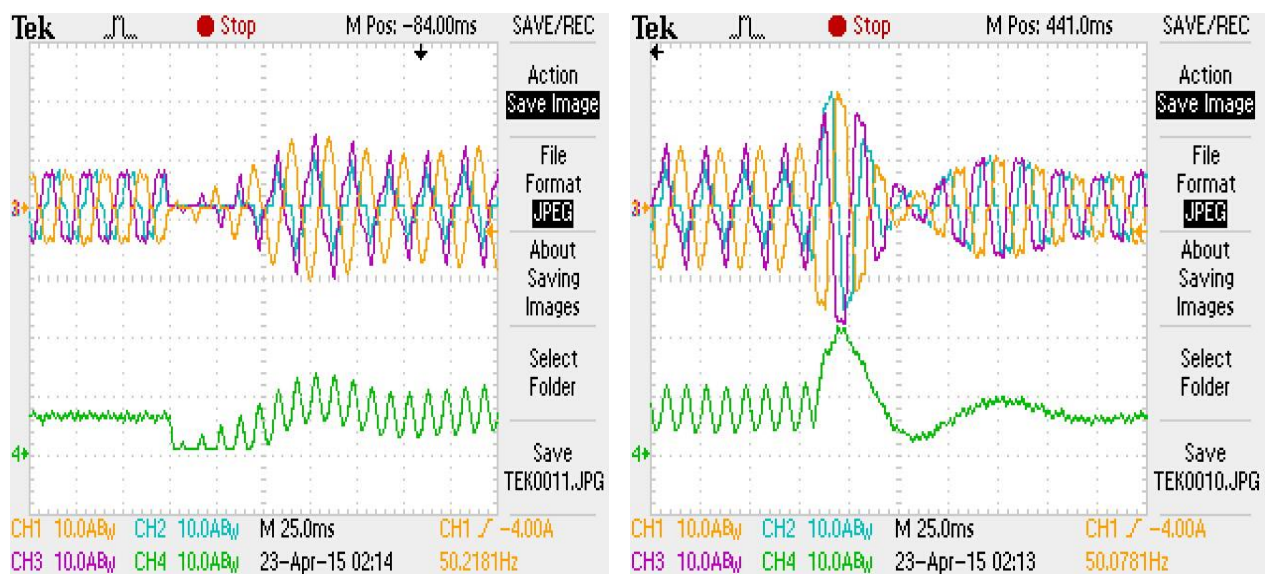
Obr. 5.15. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 800W bez regulace



Obr. 5.16. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 800W bez regulace



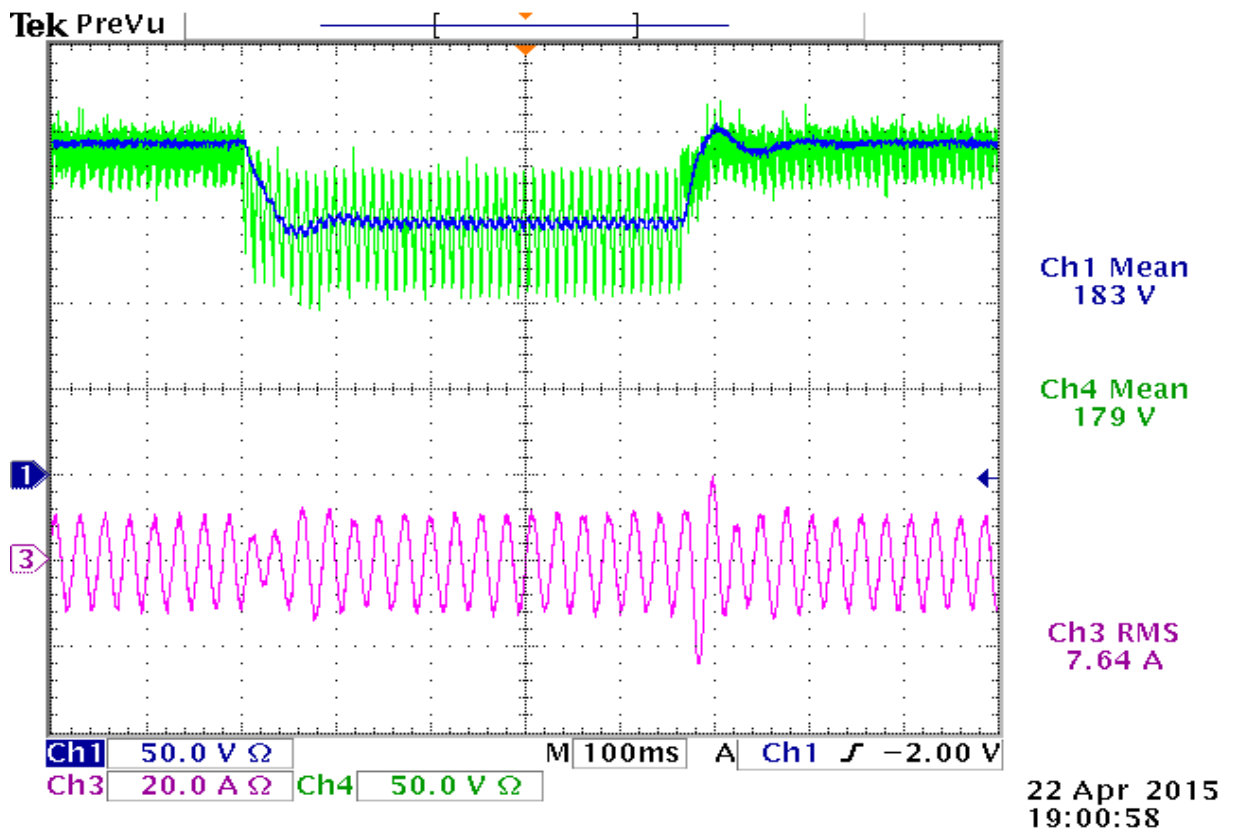
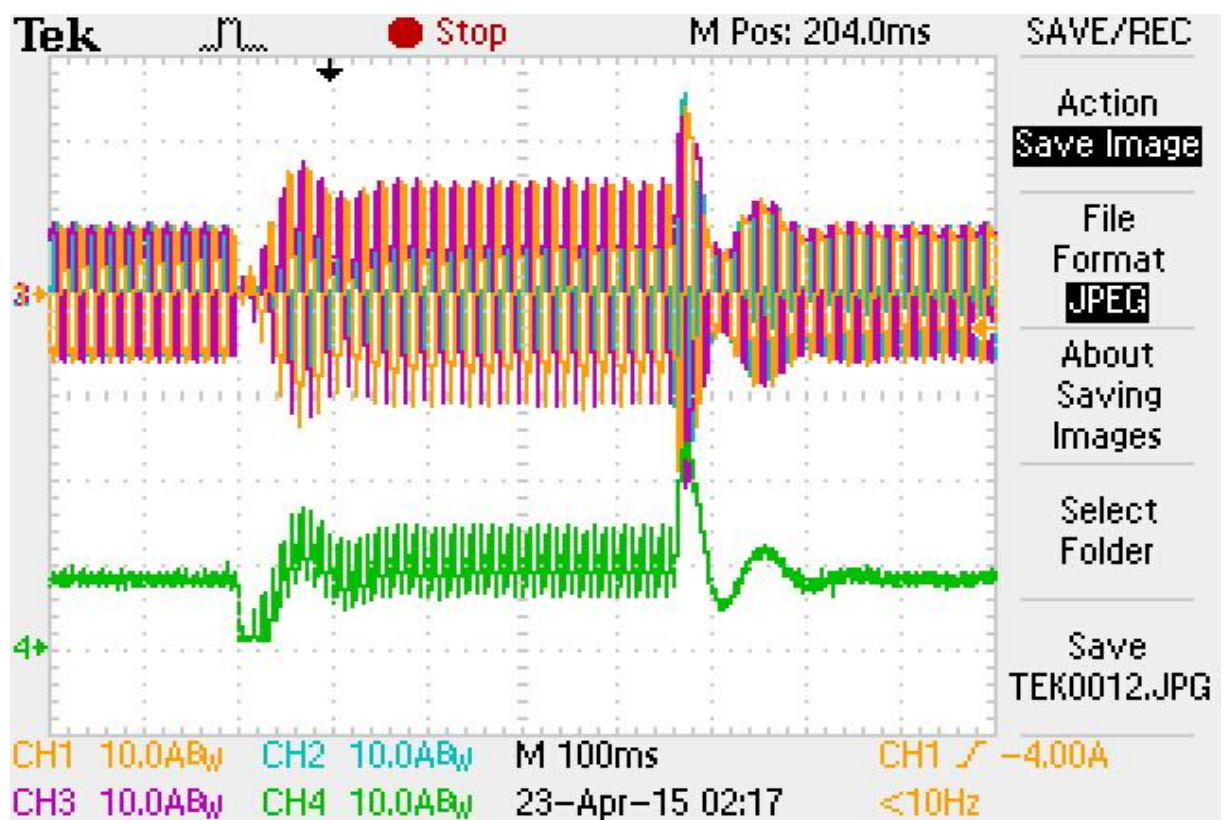
Obr. 5.17., 5.18. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 800W bez regulace zobrazený začátek a konec poklesu napětí

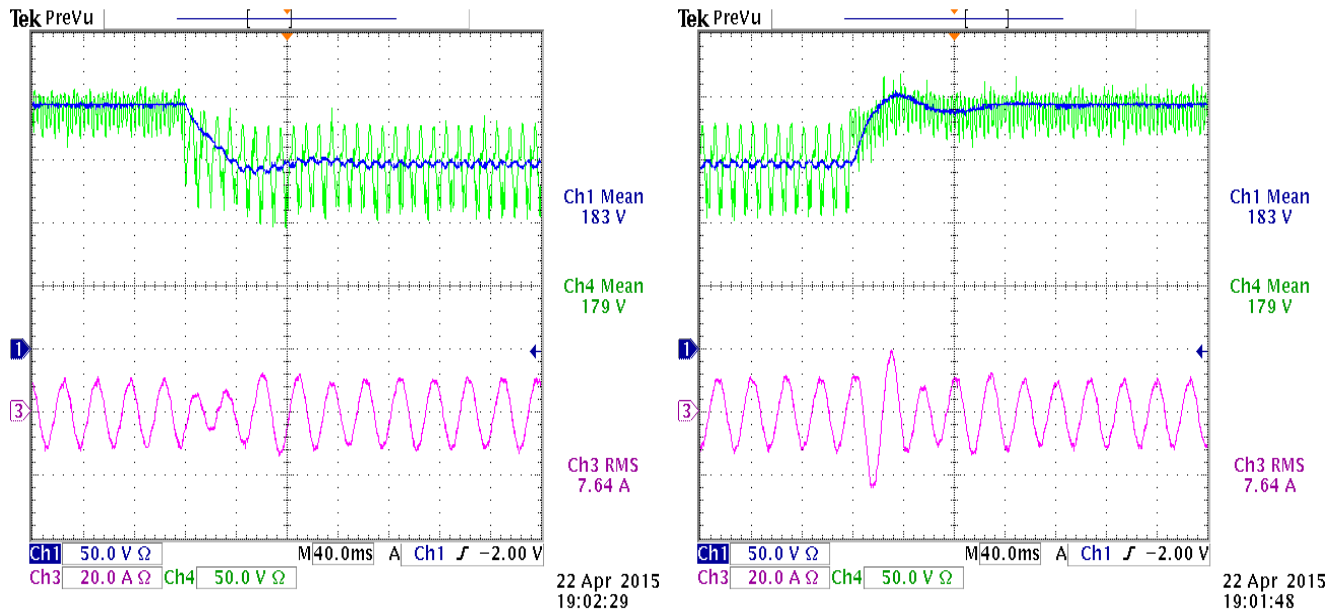


Obr. 5.19., 5.20. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 800W bez regulace zobrazený začátek a adskonekonec poklesu napětí

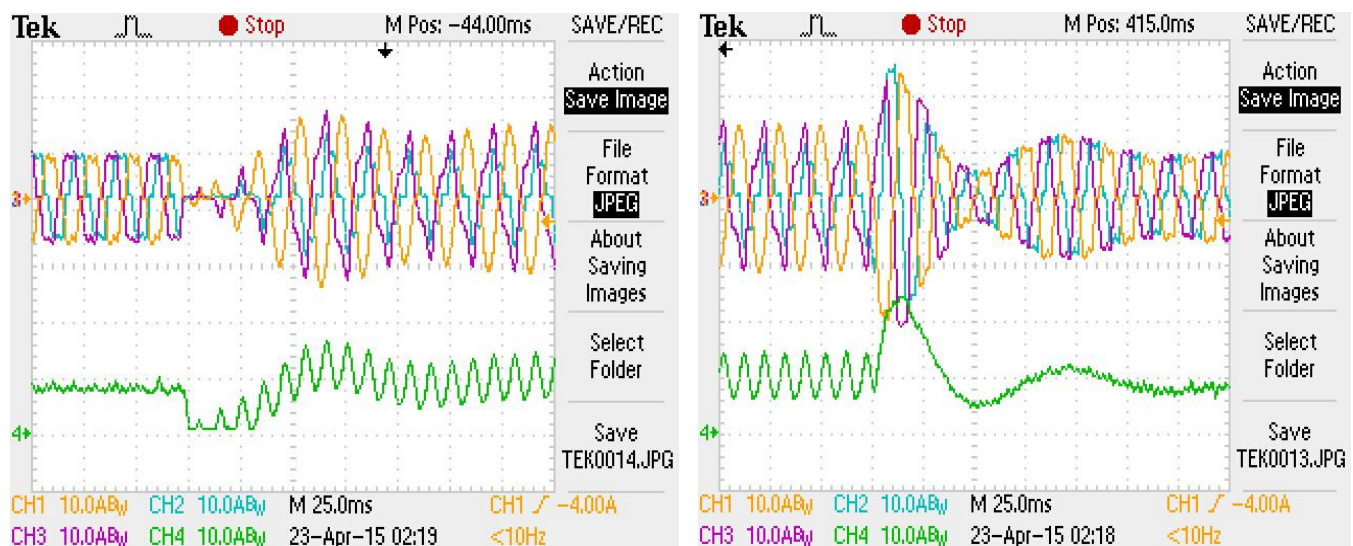
#### 5.4.5. Měření při zatížení 1200W bez regulace

V tomto případě je motor zatížen větším výkonem. Indukované napětí dynama je stejné, tedy  $U_{idyn} = 160V$ , a zatěžovací proud dynama je vyšší  $I_{dyn} = 7,5A$ . Asynchronní motor je tedy zatížen výkonem:  $P = U_{idyn} \cdot I_{dyn} = 160 \cdot 7,5 = 1200W$ . Budicí proud  $I_b = 1,15A$ . Napětí v meziobvodu  $U_c = 200V$ , které při se poklesu napětí snížilo na cca 135V.

Obr. 5.21. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 1200W bez regulaceObr. 5.22. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 1200W bez regulace



Obr. 5.23., 5.24. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 1200W bez regulace zobrazený začátek a konec poklesu napětí

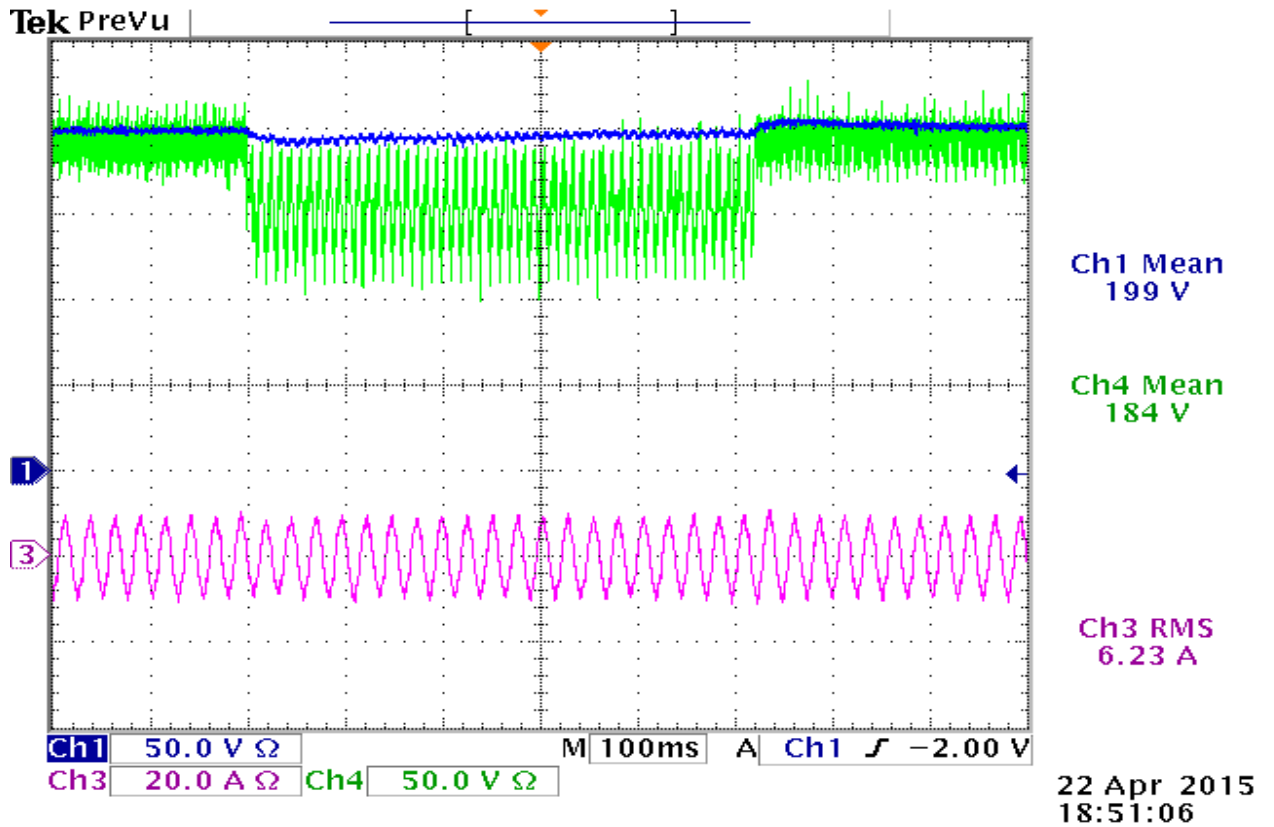


Obr. 5.25., 5.26. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 1200W bez regulace zobrazený začátek a konec poklesu napětí

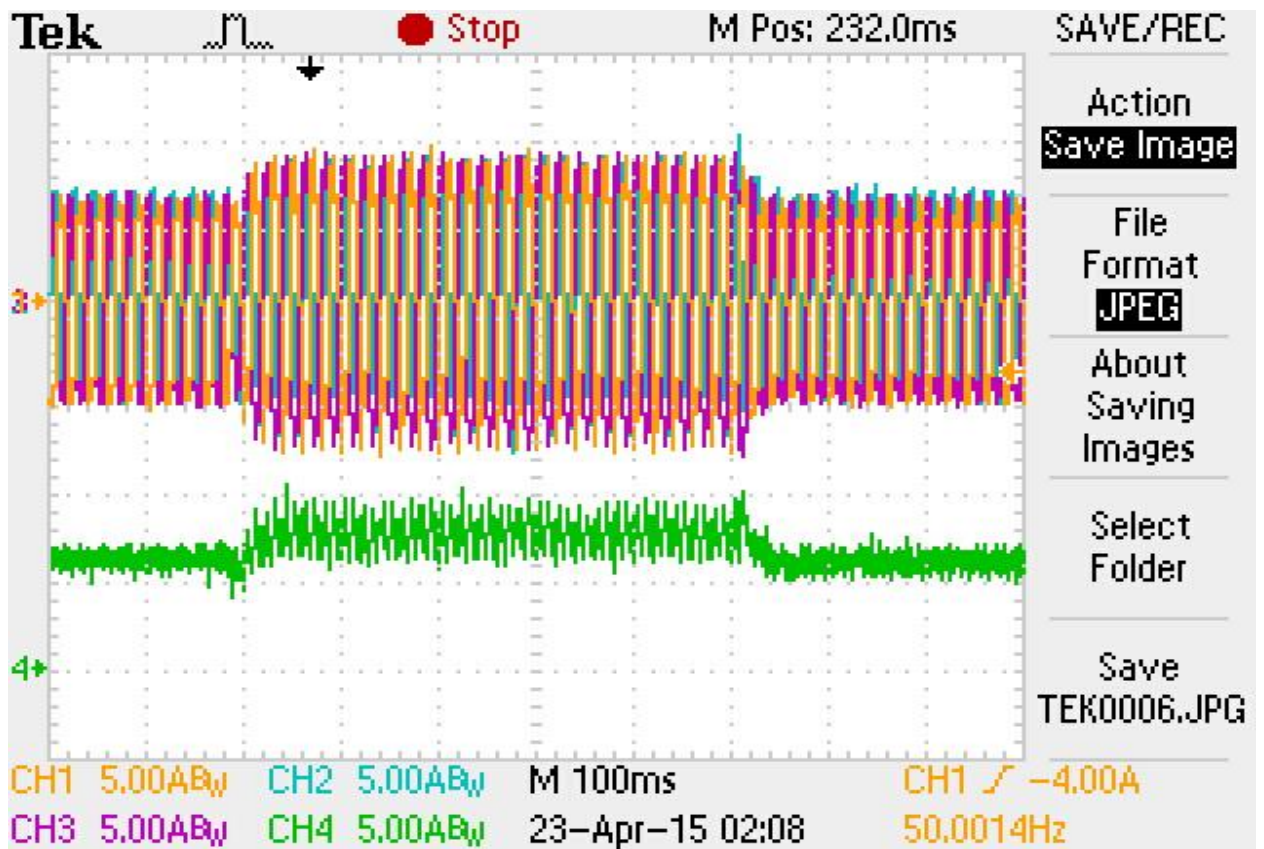
#### 5.4.6. Měření při zatížení 800W s regulací na $U_{pož} = 195V$

Pohon je zatížen pomocí dynama výkonem 800W. Pro zvýšení odolnosti je nastaveno řízení zvyšovacího pulzního měniče tak, aby udržoval hodnotu v meziobvodu na napětí  $U_{pož} = 195V$ . Proud dynama je  $I_d = 5A$  a indukované napětí  $U_{idyn} = 160V$ . Zatěžovací výkon tedy je 800W. Napětí v meziobvodu před poklesem je  $U_c = 204V$

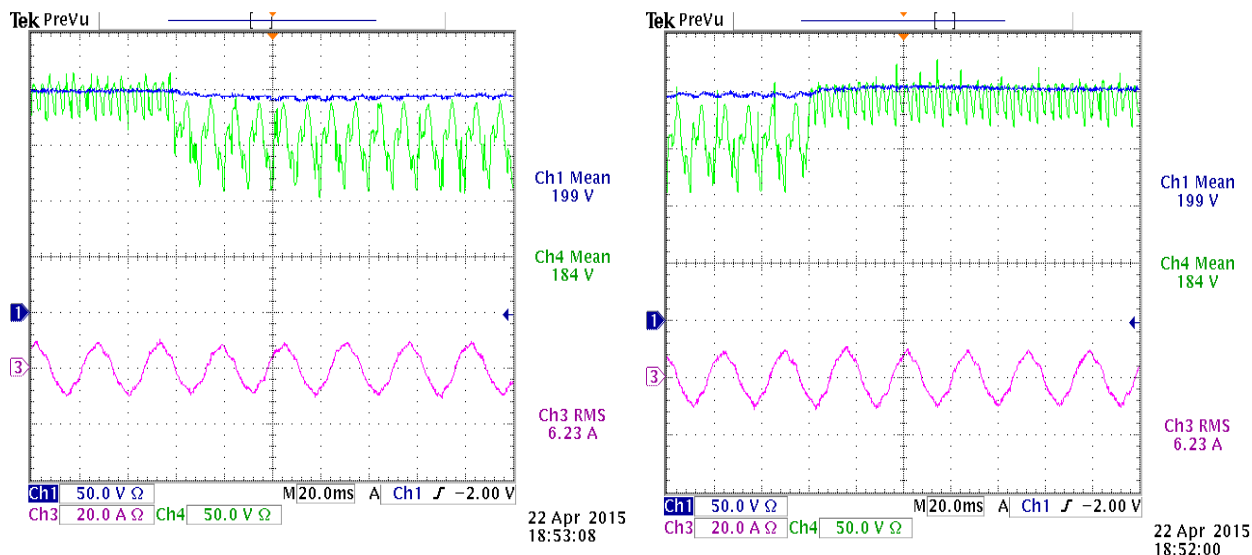




Obr. 5.27. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 800W s regulací na  $U_{poz}=195V$



Obr. 5.28. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 800W s regulací na  $U_{poz}=195V$



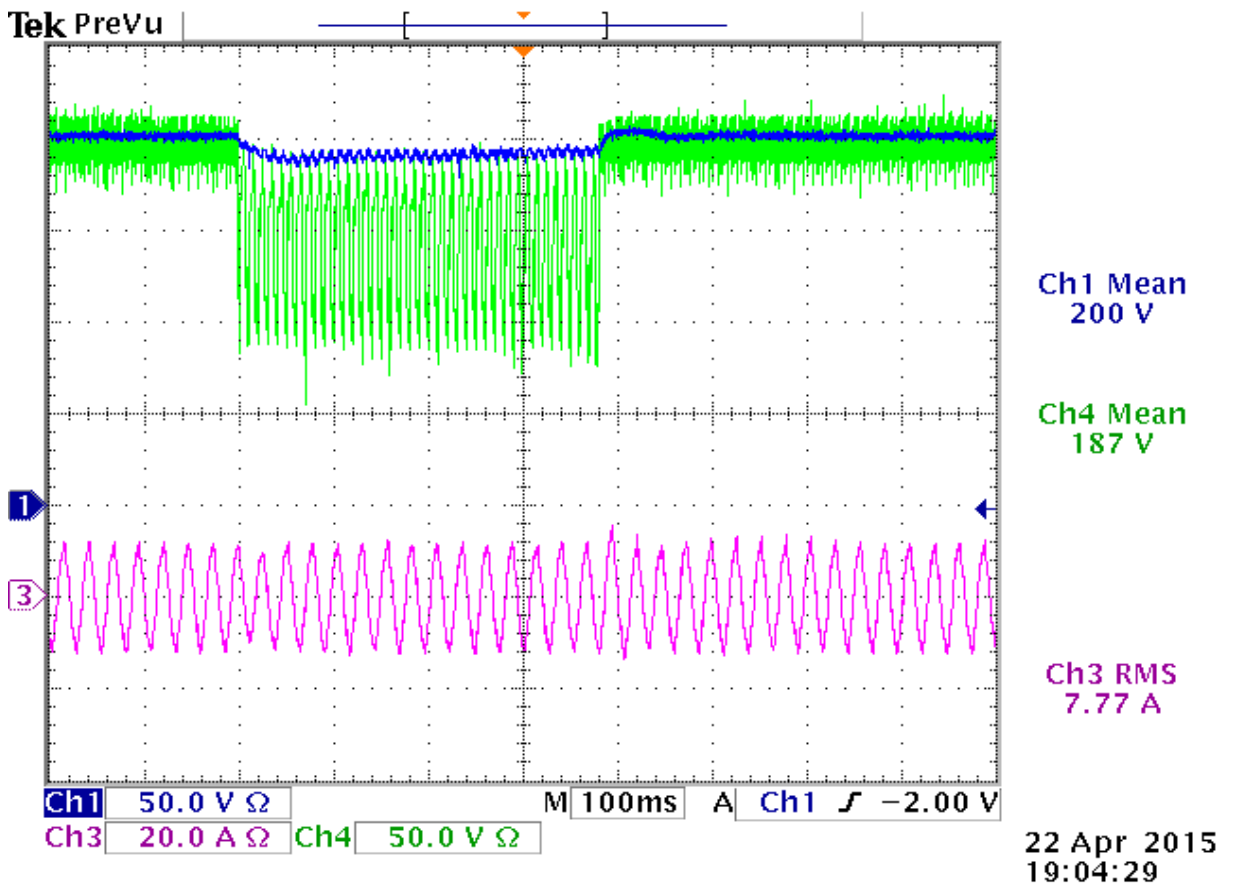
Obr. 5.29., 5.30. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 800W s regulací na  $U_{pož}=195V$  zobrazený začátek a konec poklesu napětí



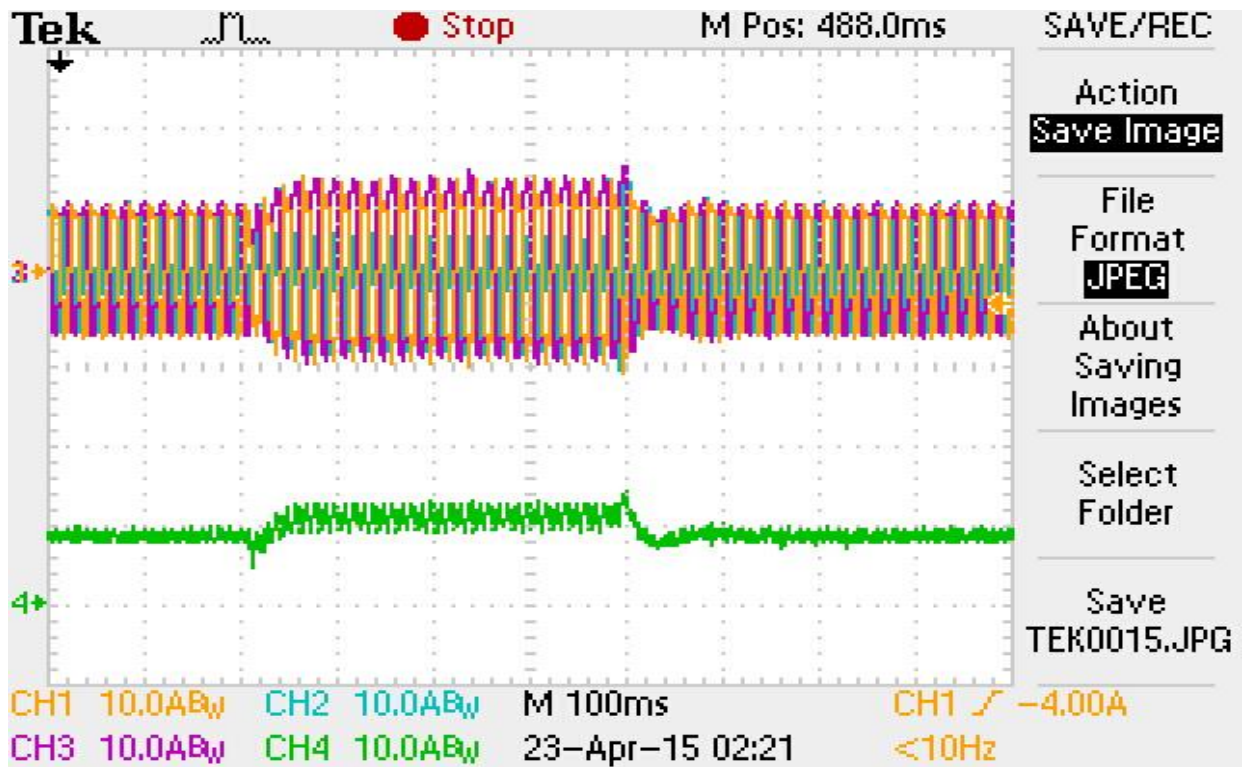
Obr. 5.31., 5.32. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 800W s regulací na  $U_{pož}=195V$  zobrazený začátek a konec poklesu napětí

#### 5.4.7. Měření při zatížení 1280W s regulací na $U_{pož} = 195V$

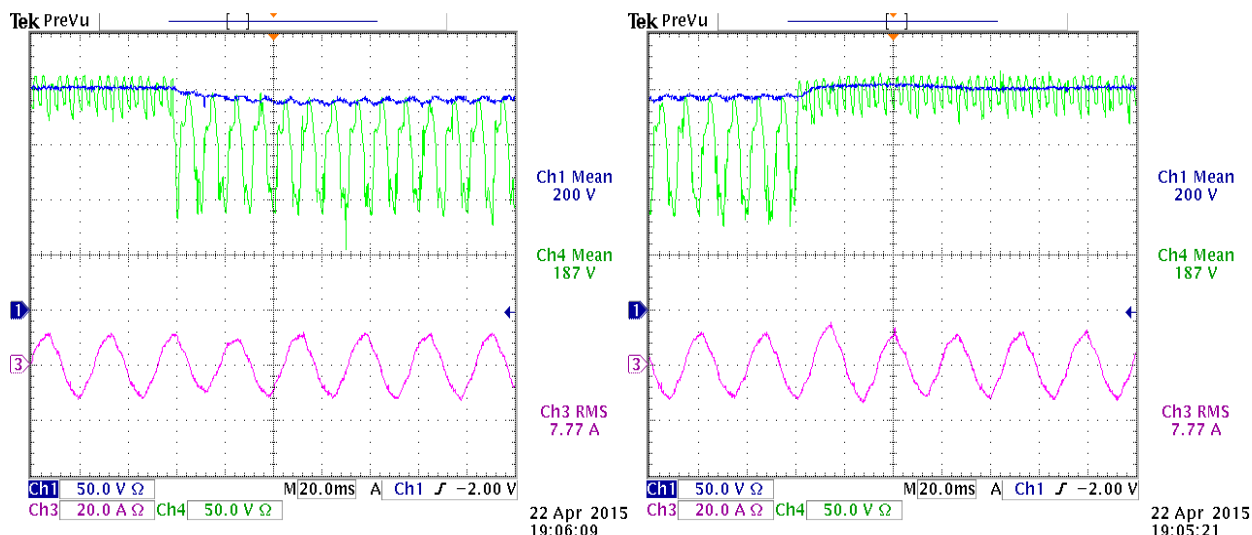
Regulace je v tomto případě nastavena stejně jako v předchozím případě na požadované napětí  $U_{pož} = 195V$ . Pohon je však zatížen vyšším výkonem. Indukované napětí dynama je  $U_{idyn} = 160V$ . Zatěžovací proud dynama je  $I_d = 8A$ . Výkon, kterým je pohon zatížen, je tedy:  $P = U_{idyn} \cdot I_{dyn} = 160 \cdot 8 = 1280W$ . Napětí v meziobvodu před poklesem je  $U_c = 202V$ .



Obr. 5.33. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{poz}=195V$



Obr. 5.34. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{poz}=195V$



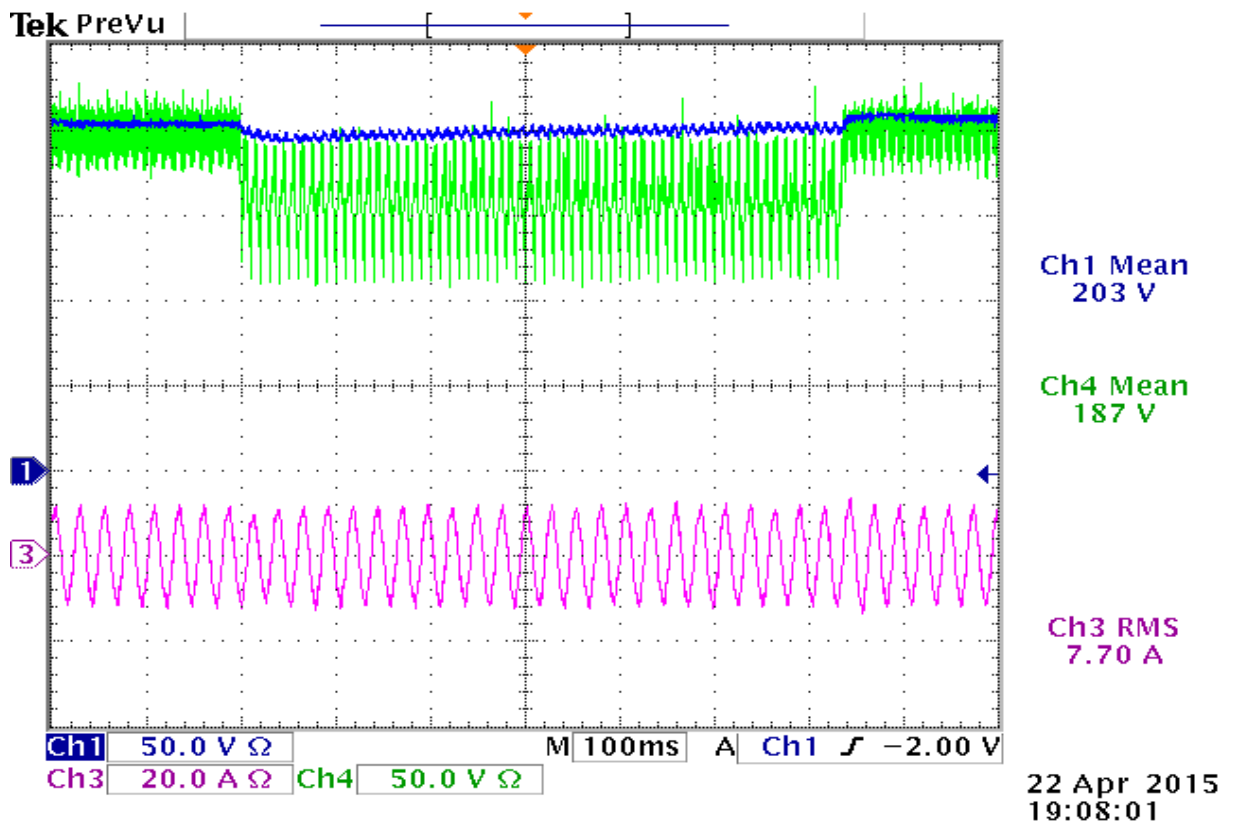
Obr. 5.35., 5.36. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{pož}=195V$  zobrazený začátek a konec poklesu napětí



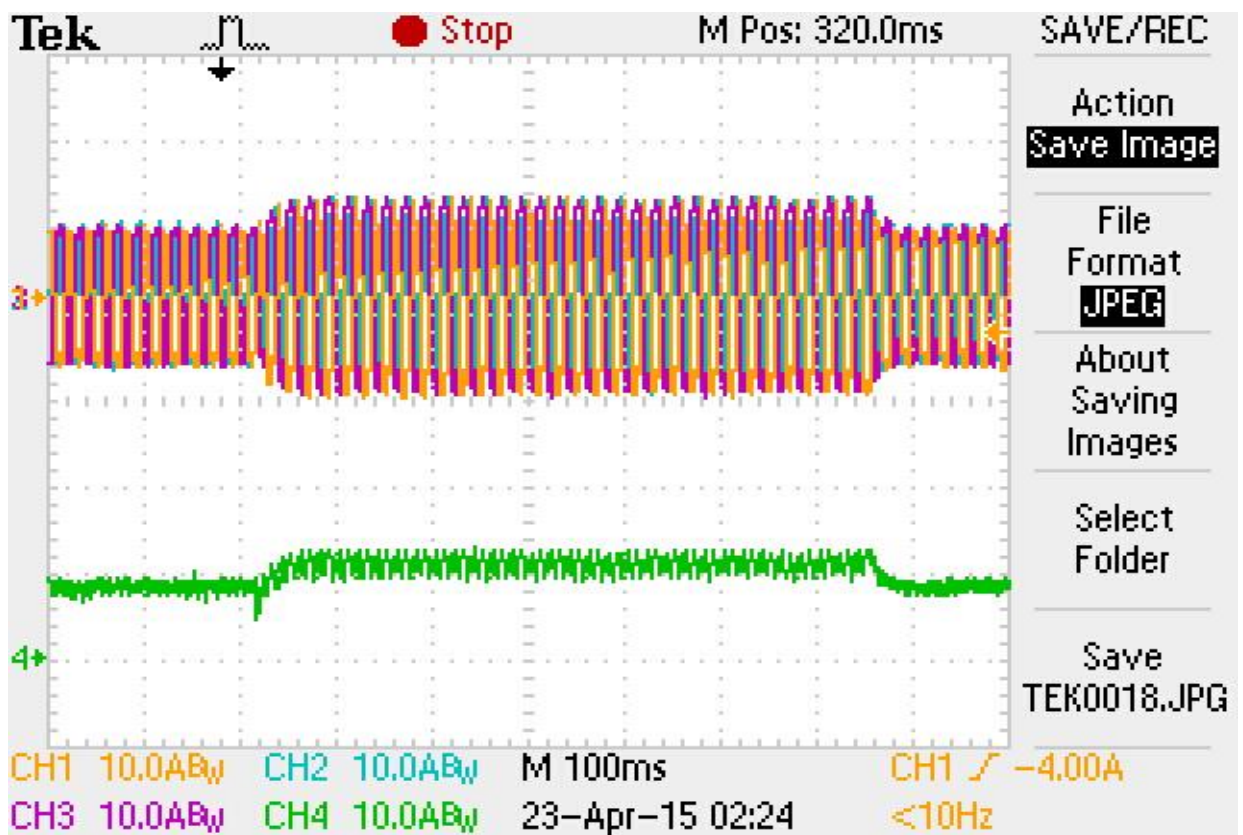
Obr. 5.37., 5.38. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{pož}=195V$  zobrazený začátek a konec poklesu napětí

#### 5.4.8. Měření při zatížení 1280W s regulací na $U_{pož} = 200V$

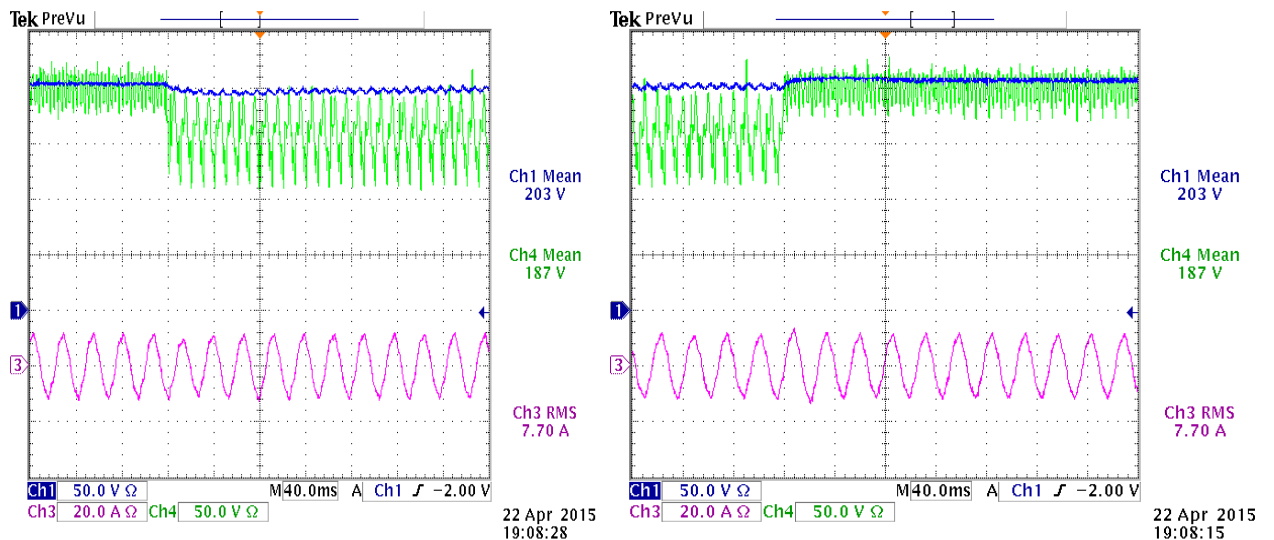
Regulace je nastavena na  $U_{pož} = 200V$ . Zbylé parametry jsou totožné s předchozím případem. Tedy indukované napětí dynam  $U_{idyn} = 160V$ . Zatěžovací proud dynam je  $I_d = 8A$ . Výkon je stejný, tedy 1280W. Napětí v meziobvodu před poklesem je  $U_c = 202V$ .



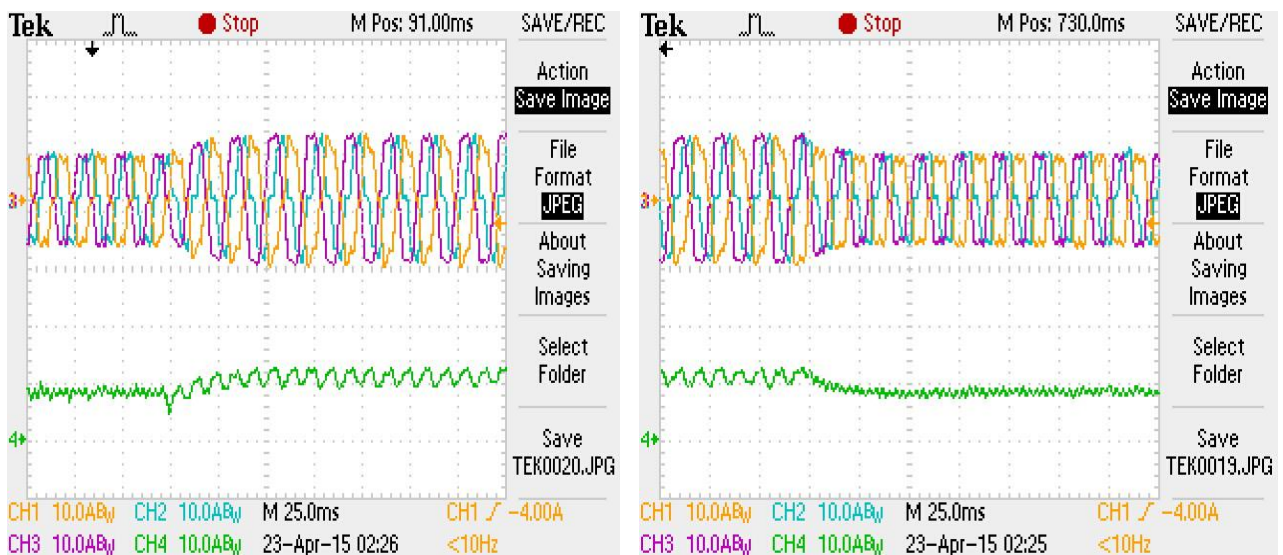
Obr. 5.39. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_d$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{poz}=200V$



Obr. 5.40. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_d$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{poz}=200V$



Obr. 5.41., 5.42. Průběh  $U_c$ ,  $I_{mot}$ ,  $U_a$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{pož}=200V$  zobrazený začátek a konec poklesu napětí



Obr. 5.43., 5.44. Průběh  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_a$  při zatížení 1280W s regulací na  $U_{pož}=200V$  zobrazený začátek a konec poklesu napětí

## 5.5. Vyhodnocení měření

Z provedeného měření je názorně vidět, jakým způsobem se chová pohon složený z nepřímého měniče kmitočtu a asynchronního motoru při nesymetrickém poklesu napětí. Měření prokázalo, že pomocí zvyšovacího pulzního měniče ve stejnosměrném meziobvodu lze zvýšit odolnost proti poklesům napětí, nebo dokonce skoro zcela eliminovat tento negativní děj.

V měření 5.4.1., kdy je motor nezatížen a pulzní měnič v meziobvodu není použit, dojde při poklesu napětí ke snížení hodnoty napětí na kondenzátoru a při obnovení napájecího napětí s lehkým zákmitem se ustálí na hodnotě jako před poklesem. Proud motorem při poklesu nepatrně klesne (obr. 5.3). Při obnovení je cca 1,5 periody průběh proudu zvýšený a poté se ustálí (obr. 5.5). Proudů napájecí  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a proud ve stejnosměrném meziobvodu  $I_d$  při obnovení napětí značně vzrostou, ale k ustálení dojde také (obr. 5.4, 5.6).

Při použití pulzního měniče v měření 5.4.2 naprázdno s regulací na  $U_{pož}=195V$  je již na průběhu zřejmě vidět, že dochází k vyrovnání napětí na kondenzátoru, i když napětí  $U_d$  před indukčností a pulzním měničem klesne (obr. 5.7). Napájecí proudy  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a proud  $I_d$  vzrostou během poklesu napětí (obr. 5.8), z toho důvodu, že pulzní měnič musí odebírat vyšší proud při zvyšování napětí, aby došlo k dodání stejného výkonu kondenzátoru jako při normálním stavu. Při obnovení napájecího napětí již nedojde k takovému proudovému nárůstu jako v předchozím případě (obr. 5.10).

Měření 5.4.3. je totožné s předchozím měření, jen s rozdílem udržování vyššího napětí pulzním měničem  $U_{pož}=200V$  na kondenzátoru. Napětí je vyrovnáno na 200V (obr. 5.11) a nedochází skoro již k žádnému proudovému nárůstu při obnovení napětí (obr. 5.14)

V případě měření 5.4.4. je motor již zatížen pomocí dynama výkonem 800W. Celkový zatěžovací výkon je navýšen ještě o mechanické ztráty. Regulace napětí pulzním měničem není zapnuta. Pokles způsobí propad napětí na kondenzátoru a nepatrně i proudu motoru (obr. 5.15). Při obnovení napětí dojde opět k přechodovému nárůstu proudu i napětí a poté dojde k ustálení (obr. 5.18). V případě napájecích proudů a proudu v meziobvodu je v průběhu poklesu patrný jejich nárůst (obr. 5.16). Výrazný je i přechodový nárůst proudů před ustálením po obnovení napětí (obr. 5.20).

Zatížení 1200W je v měření 5.4.5. Regulace není spuštěna. Průběhy jsou podobné jako v případě 5.4.4., jen dojde vlivem většího zatížení (větší o 400W) k většímu poklesu na meziobvodu (obr. 5.21). Také více vzrostou napájecí proudy a proud v meziobvodu (obr. 5.22). Přechodový nárůst proudu je také vyšší (obr. 5.26).

V praktickém provozu asi nejlépe využitelná následující trojice měření. Jedná se o měření při zatížení, kde je zaplá regulace pulzního měniče pro vyrovnání napětí. V případě 5.4.6. je to měření při zátěži 800W a regulace s požadovaným napětím  $U_{pož}=195V$ . Je vidět, že při poklesu napětí je pulzním měničem dorovnáváno na hodnotu 195V (obr. 5.27). Příznivé je kromě vyrovnání napětí i to, že nedochází k velkým přechodovým nárůstům proudu jako v případě bez regulace. Vstupní proudy a proud v meziobvodu vzrostou (obr. 5.28) během

poklesu napětí kvůli pokrytí výkonu pohonu, avšak již s příznivým přechodovým dějem (obr. 5.33).

Dalším měřením při zatížení motoru a regulací 5.4.7. je měření se zátěží 1280W. Regulace je nastavena opět na  $U_{poz}=195V$ . Napětí v meziobvodu je vyrovnáno (obr. 5.33) a napájecí proudy s proudem v meziobvodu se zvýší při poklesu (obr. 5.34) a nedochází k velkým proudovým nárůstům jako v případě bez regulace (obr. 5.38).

Posledním změřeným stavem byl případ kdy je pohon zatížen 1280W a regulován na hodnotu  $U_{poz}=200V$ . Výsledky jsou obdobné jako v případě předchozím, jen napětí v meziobvodu je udržováno vyšší o 5V, tedy na hodnotě 200V (obr. 5.40). Proudové jsou zvýšené při poklesu, ale také nedochází k přechodovým zvýšením proudu po obnovení napětí (5.44). Regulace je nastavena na 200V z důvodu rezervy. Protože i když v normálním stavu bez poklesu napětí je na meziobvodu napětí 202 – 204 V, nemůžeme tuto hodnotu nebo vyšší nastavit na regulátoru z toho důvodu, že by pulzní měnič byl v provozu neustále a bez přestání by dorovnával napětí na nastavenou hodnotu i v případě, že vlastně k poklesu nedošlo.

## 5.6. Použité přístroje

Zařízení	Parametry a označení	Invertární číslo
<b>Asynchronní motor</b>	P=3kW, 1430ot./min., 380/220V, 6.7/11.6A, $\cos\varphi=0,84$	
<b>Stejnoseměrné dynamo</b>	P=3kW, Buzení: $I_b=1.15A$ , 220V Kotva: 17A, 220V	
<b>Usměrňovače</b>	2x (3x400V, max. 30A)pro měnič kmitočtu, 3x 160V buzení	107251, 107252
<b>Osciloskop</b>	Tektronix TDS 3014B, Tektronix TDS 2014B	500402
<b>Autotransformátor</b>	RA 20,120/220V, 0-250V, 18/20A, 4-5kVA	9067
<b>Autotransformátor</b>	RA 10 120/220V, 0-250V, 8/10A, 2.5kVA	2282
<b>Střídač + zvyšovací pulzní měnič</b>	Texas Instrument TMS 320F2812, Můstky SEMIKRON SKM100GB12T4	
<b>Kondenzátory</b>	2x(6500 $\mu$ F) v sérii 3250 $\mu$ F, 400V, EPCOS-B43456-A5568-M	



## 6. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo popsat chování elektrického pohonu během poklesů napájecího napětí a jeho odolnosti proti tomuto jevu. V první řadě bylo nutné definovat pokles napětí, jak vzniká a jaké typy tohoto jevu mohou nastat. Poklesy vznikají atmosférickými poruchami nebo interními poruchami, mezi které patří například funkce opětovného zapínání, špatná funkce ochrany, spouštění velkých pohonů nebo průraz izolace. Součástí popisu vzniku poklesů napětí je i jeho šíření v elektrizační soustavě.

Poruchy sítě, mezi které pokles napětí patří, jsou popsány v kapitole druhé. Tyto poruchy jsou nesymetrie, flickr, neharmonické. Popis výpočtu vzniku nesymetrií je popsán pomocí matic. Jsou zde uvedeny i zdroje nesymetrie, mezi které patří například zatížení třífázové soustavy při napájení troleje v střídavé elektrické trakci. Neharmonické průběhy jsou popsány Fourierovou řadou. Flickr, který patří také mezi poruchy sítě je zde popsán, také jeho vznik, šíření a omezení pomocí statických kompenzátorů.

Popis působení poklesů napětí na vybrané typy elektrických pohonů je součástí třetí kapitoly. Vybrané elektrické pohony jsou asynchronní a synchronní stroj přímo připojený na síť, kde se řeší především pokles napětí při rozběhu těchto strojů. Další typ pohonu je nejrozšířenější typ pohonu, a to asynchronní motor napájený měničem kmitočtu. Zde je popsáno složení měniče a parametrů, které jsou ovlivněny poklesem napájecího napětí. Je to především napětí na kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu. Posledním popsáním typem je stejnosměrný motor napájen tyristorovým usměrňovačem.

Důležitá část práce byla věnována prostředkům, které zvyšují odolnost elektrického pohonu proti poklesům napětí. Možnosti zvýšení odolnosti jsou rozděleny podle principu, kterým se toho dosahuje. Jedná se o zdroje akumulující energii, upravení pohonu z hlediska použití měničů, které jsou proti poklesům odolnější a jako poslední je uvedeno pokročilé řízení, kterým lze odolnost zvýšit také. Pro akumulaci energie lze použít akumulátorové baterie, kondenzátory, superkondenzátory, supravodivé cívky či setrvačníky. Tyto zdroje energie jsou využity především v zařízeních pro nepřerušované napájení UPS. Tato zařízení mohou udržet elektrický pohon v provozu dokonce i při úplném výpadku napájení a to po různou dobu, která záleží právě na akumulacím prvku. Elektronické měniče, které mohou zvýšit odolnost pohonu jako celku, jsou na principu zvyšování napětí pomocí zvyšovacího pulzního měniče, ovšem za cenu vyššího proudového namáhání sítě. Tohoto principu lze využít při použití pulzního usměrňovače na vstupu měniče kmitočtu, nebo zvyšovacího pulzního měniče ve stejnosměrném meziobvodu měniče kmitočtu. Pokročilé řízení se využívá pro regulaci pohonů s asynchronními motory. Mezi tyto možnosti řízení patří vektorové řízení a přímé řízení momentu, které jsou ekvivalentní.

V praktické části bylo provedeno měření na pohonu s asynchronním motorem a měničem kmitočtu. Odolnost pohonu je zkoumána při třech typech měření. Při prvním typu měření pohon není zatížen a jeho odolnost není zvýšena. V tomto případě je z naměřených průběhů vidět jakým způsobem klesne napětí v meziobvodu na kondenzátoru a také průběhy odebíraných proudů a proudu ve stejnosměrném meziobvodu. Při obnovení napětí na hodnotu

jmenovitou dochází k přechodnému zvýšení proudů a následnému ustálení na hodnotu, která byla před poklesem. Při dalším měření je odolnost pohonu zvednuta pomocí zvyšovacího pulzního měniče. Při poklesu dochází k dorovnání napětí na kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu a mírného zvýšení odebíraného proudu. Přechodové zvýšení proudů není tolik razantní jako v případě bez regulace. Další případy jsou, kdy je pohon zatížen. Charakteristiky bez regulace zobrazují také poklesy v meziobvodu, které jsou větší než v případě bez zatížení. Proud vstupující do měniče a proud v meziobvodu při obnovení napětí mají také přechodný charakter, který odezní po delší době, než v případě kdy je pohon nezatížen. V případě regulace při zatížení pomocí zvyšovacího pulzního měniče opět dorovnáva napětí na kondenzátoru na požadovanou hodnotu a omezí přechodné zvýšení proudu po obnovení napětí. Ke zvýšení proudů v měniči při poklesu napětí při zatížení dochází ve snaze udržet konstantní výkon. Maximální zatížení pohonu v tomto měření bylo 1280W. Bylo tedy prakticky prokázáno, že pomocí zvyšovacího pulzního měniče ve stejnosměrném meziobvodu lze zvýšit odolnost pohonu s asynchronním motorem a měničem kmitočtu vůči krátkodobým nesymetrickým poklesům napětí.

## 7. Literatura

- [1] Česká státní norma, ČSN EN 50 160, *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*
- [2] Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, PNE 33 3430-4, *Parametry kvality elektrické energie-Část 4: Poklesy a krátká přerušení napětí*, [4.2.2015] [Online], <<http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203430-4%20ed.3tisk.pdf>>
- [3] Vápeník R., *Opětné zapínání v distribuční soustavě vysokého napětí*, [5.2.2015] [Online], <<http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.elektrorevue.cz%2Ffile.php%3Fid%3D200000420-9842e993ce&ei=OJ3SVPXmCsa3UaSsgyg&usq=AFQjCNFvHILxWaOj9s7htrJHz5L7kUup0Q&bvm=bv.85142067,d.d24>>
- [4] Chapman D., *Kvalita elektrické energie 5-1, Poklesy napětí – Úvod*, [13.2.2015] [Online], <<http://copperalliance.eu/cz/publikace?taxonomy=tags&propertyName=tags&taxon=power-quality&page=1>>
- [5] Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, PNE 33 3430-0, *Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*, [14.2.2015] [Online], <<http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203430-0%204.vyd..pdf>>
- [6] Konvičný J., *Spolupráce sběrače s trakčním vedením*, [14.2.2015] [Online], <[http://www.railvolution.net/czechraildays/2003/seminare/zi\\_06.pdf](http://www.railvolution.net/czechraildays/2003/seminare/zi_06.pdf)>
- [7] Hanzelka Z., Bieň A., *Kvalita elektrické energie 5-1-3, Poruchy napětí – Flickr*, [13.2.2015] [Online], <<http://copperalliance.eu/cz/publikace?taxonomy=tags&propertyName=tags&taxon=power-quality&page=1>>
- [8] Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie, PNE 33 3430-3, *Parametry elektrické energie – Část 3: Nesymetrie a změny kmitočtu napětí*, [14.2.2015] [Online], <<http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203430-3%203.v%20tisk.pdf>>
- [9] Kůs V., *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*, Nakladatelství BEN -technická literatura, Praha 2002, ISBN 80-7300-062-8
- [10] Driesen J., Craenenbroeck T., *Kvalita elektrické energie 5-1-4, Rušení napětí – Úvod do nesymetrie*, [14.2.2015] [Online], <<http://copperalliance.eu/cz/publikace?taxonomy=tags&propertyName=tags&taxon=power-quality&page=1>>
- [11] Softstartéry, *Průvodce problematikou softstartérů ABB*, [22.3.2015] [Online], <[http://www08.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/\\$file/Softstarter-%20handbook.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/$file/Softstarter-%20handbook.pdf)>

- [12] Bartoš V., Červený J., Hruška J., Kotlanová A., Skála B., *Elektrické stroje*, Skripta ZČU FEL, Plzeň 2011, ISBN 978-80-7043-444-4
- [13] Tesárek R., *Synchronní stroje s permanentními magnety*, Plzeň 2013, bakalářská práce (Bc.) Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [14] Flajtingr J., Kule L., *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*, Skripta ZČU FEL, Plzeň 2005, ISBN 80-7043-354-X
- [15] Djokić S. Ž., Stockam K., Milanović J.V., Desmet J.J.M., Belmans R., *Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions*, IEEE Xplore [21.3.2015] [Online], <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1375132>>
- [16] Shewale Atul M., Kushare B.E., *Effect of Voltage Sag on Ageing of Front End Rectifier Diodes of ASD*, IEEE Xplore [22.3.2015] [Online], <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6527718>>
- [17] Kůs V., *Elektrické pohony a výkonová elektronika*, Skripta ZČU FEL, Plzeň 2006, ISBN 80-7043-422-8
- [18] Pavelka J., Čerovský Z., Lettl J., *Výkonová elektronika*, Skripta ČVUT FEL, Praha 2007, ISBN 978-80-01-03626-6
- [19] Vondrášek F., *Výkonová elektronika svazek III. Měníče s vlastní komutací a bez komutace*, Skripta ZČU FEL, Plzeň 1998, ISBN 80-7082-485-9
- [20] N.S. Tunaboylu, E.R. Collins, Jr., and S.W. Middlekauff, *RIDE-THROUGH ISSUE FOR DC MOTOR DRIVES DURING VOLTAGE SAG*, IEEE Xplore [5.4.2015] [Online], <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=513056>>.
- [21] Kůs V., Skála J., Hammerbauer J., *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*, BEN – technická literatura Praha 2013, ISBN 978-80-7300-476-7
- [22] Markiewicz H., Klajn A., *Kvalita elektrické energie 4-3-1, Odolnost - Zlepšování spolehlivosti pomocí záložních zdrojů energie*, [13.2.2015] [Online], <<http://copperalliance.eu/cz/publikace?taxonomy=tags&propertyName=tags&taxon=power-quality&page=1>>
- [23] *Superkondenzátor*, [1.5.2015] [Online], <<http://www.elektronovinky.cz/soucastky/superkondenzator>>
- [24] Čerovský Z., Pavelka V., *PODMÍNKY PRO VYBÍJENÍ SUPERKONDENZÁTORŮ POUŽITÝCH V HYBRIDNÍCH ELEKTRICKÝCH VOZIDLECH*, XXVIII. poh.konference Plzeň,[1.5.2015][Online], <[http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241BOZEK/publikace/2003/Supcap2\\_P PVS.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241BOZEK/publikace/2003/Supcap2_P PVS.pdf)>

- [25] Didden M., *Kvalita elektrické energie 5-3-4, Poklesy napětí – Doporučení pro výběr vhodného zařízení zmírňujícího poklesy napětí*, [13.2.2015] [Online], <<http://copperalliance.eu/cz/publikace?taxonomy=tags&propertyName=tags&taxon=power-quality&page=1>>
- [26] Zeman K., *Automatická regulace pohonů – Výťah z přenášek*, FEL ZČU 2013
- [27] Pittermann M., Kůs V., *Pohon s asynchronním motorem a napěťovým střídačem z hlediska vlivů poklesu napájecího napětí*, XXXII. Konference o elektrických pohonech, Plzeň 2011, ISBN 978-80-02-0238-1
- [28] Pérez N. L., Donisón M. P., *Technical Methods for the Prevention and Correction of Voltage Sags and Short Interruptions inside the Industrial Plants and in the Distribution Networks*, [10.2.2015] [Online], <<https://www.ipqdf.com/technical-methods-for-the-prevention-and-correction-of-voltage-sags-and-short-interruptions-inside-the-industrial-plants-and-in-the-distribution-networks/>>
- [29] Šmíd J., *Stanovení mezních hodnot rušivých vlivů ve veřejných distribučních sítích v návaznosti na české a mezinárodní normy se zaměřením na poklesy a přerušování napětí*, [10.2.2015][Online], <[http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fhomen.vsb.cz%2F~san50%2FCeska%2FGACR%2FPoklesy\\_a\\_preruseni\\_napeti1.doc&ei=5qtDVKqhK8jV7AbqnoGYBQ&usg=AFQjCNHNUlegcjoZmzE0dVvZS\\_prdhOhAQ&bvm=bv.77880786,d.ZGU](http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fhomen.vsb.cz%2F~san50%2FCeska%2FGACR%2FPoklesy_a_preruseni_napeti1.doc&ei=5qtDVKqhK8jV7AbqnoGYBQ&usg=AFQjCNHNUlegcjoZmzE0dVvZS_prdhOhAQ&bvm=bv.77880786,d.ZGU)>