

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kinlovič** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **453271**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vývoj a realizace aplikačního programu a vizualizace pro řídicí systém a operátorský panel pro testovací zařízení sdílení momentu ve vícemotorové mechanicky spjaté soustavě

Název diplomové práce anglicky:

Vizualization of Control System for Multi Motor Torque Sharing Testing Device

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte vícemotorovou mechanicky spjatou soustavu po mechanické stránce a porovnejte možné metody rozdělení zátěže,
- 2) Navrhněte koncepci testovacího zařízení vícemotorové mechanicky spjaté soustavy,
- 3) Navrhněte vhodný řídicí program a vhodnou vizualizaci.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Schneider Electric [online] <http://www.schneider-electric.com/>
- [2] VOŽENÍLEK, P., NOVOTNÝ, V., MINDL, P., Elektromechanické měniče, dotisk 2. vyd., České vysoké učení technické v Praze, 2015
- [3] KOBRLE, P., PAVELKA, J., Elektrické pohony a jejich řízení, 3. přepracované vyd., České vysoké učení technické v Praze, 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radek Havlíček, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **05.12.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **09.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Radek Havlíček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



**Vývoj a realizace aplikačního programu a
vizualizace pro řídicí systém a operátorský
panel pro testovací zařízení sdílení
momentu ve vícemotorové mechanicky
spjaté soustavě**
Diplomová práce

2018

Jakub Kinlovič

Pod'akovanie

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu práce Ing. Radkovi Havlíčkovi, Ph.D. za jeho pomoc, uvedenie do problematiky a rady pri tvorení tejto práce. Taktiež by som sa chcel poďakovať Ing. Jozefovi Borzovi, Ing. Nikolayovi Stefanovovi a Ing. Svetozarovi Baykushevovi za školenia a rady, ktoré boli potrebné pre vytvorenie tejto práce.

Čestné vyhlásenie

Vyhlasujem, že som celú diplomovú prácu vypracoval samostatne s použitím uvedenej odbornej literatúry.

Praha, 14.12.2017

.....

podpis

Abstrakt

Táto práca sa venuje problematike zdieľania momentu vo viacmotorovej sústave v súvislosti s aplikačnými funkciami frekvenčného meniča Altivar Process ATV 930 a s využitím operátorského grafického rozhrania. Vo viacmotorovej sústave jeden motor simuluje rôzne typy záťaže a dva motory túto záťaž pokrývajú, pričom spojenie motorov bolo považované za pevnú väzbu. Vizualizácia pre operátorský panel bola vytvorená v programe Citect Studio. Dáta sa medzi meničmi a serverom vizualizácie odosieli po Ethernete s použitím protokolu Modbus TCP. Výsledkom práce je porovnanie metód zdieľania záťaže v tejto sústave a vizualizácia, z ktorej je celú sústavu možné riadiť.

Kľúčové slová

Motor, menič, moment, záťaž, vizualizácia, Altivar, Citect

Abstract

This thesis presents the issue of torque sharing in the multi-drive system regarding the application functions of the frequency converter Altivar Process ATV 930 and operator graphical interface. In the multi-drive system, one motor simulates different types of load and two motors share this load, considering there is a rigid connection between the motors. The visualization for the operator panel was created in programme Citect Studio. The communication between converters and the visualization server was over Ethernet using the Modbus TCP protocol. The result of the thesis is a comparison of the load-sharing methods for this system and the visualization to control the whole system.

Keywords

Motor, converter, torque, load, visualization, Altivar, Citect

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Súčasný stav	9
1.2	Formulácia úlohy a ciele práce	10
2	Asynchrónny motor	11
2.1	Princíp činnosti, konštrukcia stroja	11
2.2	Napäťové rovnice, náhradná schéma, sklz asynchrónneho motora	13
2.3	Moment asynchrónneho stroja	14
2.4	Zmena mechanickej charakteristiky pri zmene parametrov	15
2.5	Skalárne riadenie	18
2.6	Vektorové riadenie	20
3	Menič frekvencie	22
3.1	Princíp fungovania	22
3.2	Nepriame frekvenčné meniče	22
3.3	Riadenie pomocou meniča AltivarProcess ATV 930	25
4	Mechanika motorov	26
5	Operátorský panel	28
5.1	HMI systémy	28
5.2	Panel HMIDID7DT0	29
5.3	Citect Studio	29
6	Komunikácia po Ethernete	30
6.1	Ethernet	30
6.2	Modbus TCP	30
7	Ovládanie meniča Altivar Process ATV930	32
7.1	Stavový register, Riadiaci register	33
7.2	Spúšťanie motorov	34

7.3	Kompenzácia sklzu.....	36
7.4	Korekcia záťaže (Load correction).....	38
7.5	IR kompenzácia.....	39
7.6	Master-Slave nastavenie.....	39
8	Zdieľanie momentu v sústave.....	40
8.1	Popis systému.....	40
8.2	Prirodzené rozdelenie momentov (bez regulácie).....	43
8.3	Load balancing - vyrovnávanie záťaže.....	49
8.4	Master - Slave.....	52
9	Vizualizácia systému.....	55
9.1	Výber metódy zdieľania momentu.....	56
9.2	Konfigurácia meničov.....	57
9.3	Generovanie profilov frekvencie a záťažného momentu.....	58
9.4	Stránka trendov/riadiaca stránka.....	61
10	Záver.....	64
11	Prílohy.....	66
12	Zoznam použitej literatúry.....	72

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Vzhľad vodičov rotora asynchrónneho motora s kotvou nakrátko [4].....	12
Obr. 2 Náhradná schéma asynchrónneho motora s kotvou nakrátko	13
Obr. 3 Prúd rotora a moment asynchrónneho stroja.....	14
Obr. 4 Mechanické charakteristiky pri zmene napájacieho napätia	15
Obr. 5 Mechanické charakteristiky pri variabilnej frekvencii napájacieho napätia	16
Obr. 6 Mechanické charakteristiky pri zmene parametrov napájacieho napätia pri dodržaní $U/f=\text{konšt.}$	17
Obr. 7 Mechanické charakteristiky pri skalárnom riadení s uplatnením korekcie napätia K_f	18
Obr. 8 Názorný príklad vplyvu korekcie napätia K_f	19
Obr. 9 Schéma nepriameho frekvenčného meniča	22
Obr. 10 Schéma neriadeného usmerňovača.....	23
Obr. 11 Schéma výstupného striedača frekvenčného meniča	24
Obr. 12 Vzhľad meniča Altivar Process ATV930.....	25
Obr. 13 Spojenie použitého motora s hriadeľom cez ozubený remeň.....	27
Obr. 14 Vzhľad panelu HMIDID7DT0 [11]	29
Obr. 15 Štruktúra správy Modbus-u s príkladom čítania n-slov [13].....	31
Obr. 16 Regulačná schéma vektorového beznímačového riadenia meniča Altivar Process ATV 930.....	32
Obr. 17 Diagram možných stavov pri spúšťaní meniča [14].....	35
Obr. 18 Funkcia kompenzácie sklzu pri zmene záťaže a nastavení na 100%	36
Obr. 19 Časové priebehy veličín momentu a frekvencie asynchrónneho motora s výkonom 5,5 kW	37
Obr. 20 Mechanická charakteristika motora pri skokovej zmene momentu	37
Obr. 21 Funkcia korekcie záťaže meniča Altivar Process ATV 930.....	38
Obr. 22 Schéma zapojenia prvkov vo viacmotorovej sústave a jej riadiacej sústave [11][15]	40
Obr. 23 Priebehy momentov motorov a frekvencie systému bez regulácie systému pri konštantnej záťaži	44

Obr. 24	Priebehy momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie pri ventilátorovej záťaži ...	45
Obr. 25	Priebehy momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie a simulovanej pulznej záťaži	46
Obr. 26	Priebehy momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie s použitím kompenzácie sklzu SLP = 100% na motor ATV930_1 a pulznej záťaži	47
Obr. 27	Priebehy momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie s použitím kompenzácie sklzu SLP = 100% na oba motory ATV930_1 a ATV930_2 a pulznej záťaži.....	48
Obr. 28	Priebehy momentov motorov a ich frekvencie pri metóde load balancing s LBC = 0,2 Hz pre motor ATV930_1 pri ventilátorovej záťaži.....	49
Obr. 29	Priebehy momentov motorov a ich frekvencie pri metóde load balancing s LBC = 0,2 Hz pre motor ATV930_1 pri pulznej záťaži	50
Obr. 30	Výsledky rozdielu v momente pre rôzne zaťaženia systému a tomu prispôsobený parameter LBC	51
Obr. 31	Priebehy momentov motorov a frekvencie pri Master-Slave režime a kvadratickej záťaži	53
Obr. 32	Priebehy momentov motorov a ich frekvencie pri Master/Slave princípe a pulznej záťaži	54
Obr. 33	Umiestnenie operátorského panelu do pôvodnej rozvodnej skrine viacmotorovej sústavy.....	55
Obr. 34	Vzhľad vytvorenej obrazovky pre výber metódy zdieľania momentu.....	56
Obr. 35	Vzhľad vytvorenej obrazovky konfigurácie meničov	57
Obr. 36	Vzhľad vytvorenej obrazovky pre generovanie referenčnej frekvencie a záťažného momentu.....	59
Obr. 37	Vzhľad vytvorenej obrazovky trendov/riadiacej stránky	61

Zoznam použitých symbolov a skratiek

U_i	Indukované napätie
U_1	Napätie statora
U_2	Napätie rotora
R_1	Odpor statora
R_2	Odpor rotora
R_2'	Odpor rotora prepočítaný na stator
$X_{1\sigma}$	Rozptylová reaktancia statora
$X_{2\sigma}$	Rozptylová reaktancia rotora
$X_{2\sigma}'$	Rozptylová reaktancia rotora prepočítaná na stator
I_1	Prúd statora
I_2	Prúd rotora
I_2'	Prúd rotora prepočítaný na stator
X_μ	Magnetizačná reaktancia
L_μ	Magnetizačná indukčnosť
I_μ	Magnetizačný prúd
f_1	Statorová frekvencia
f_2	Rotorová frekvencia
Ψ	Magnetický tok
t	Čas
F	Sila
B	Magnetická indukcia
l	Dĺžka vodiča
P_δ	Výkon vo vzduchovej medzere
s	Sklz motora
s_{zv}	Sklz zvratu
ω_1	Synchrónna uhlová rýchlosť
ω_m	Mechanická uhlová rýchlosť
K_f	Korekčný faktor
ε	Uhol natočenia priestorového vektora voči statorovým súradniciam α, β
σ	Uhol natočenia priestorového vektora voči otáčavým rotorovým súradniciam
M_m	Moment motora
M_z	Moment záťaže
M_a	Dynamický moment

J_m	Moment zotrvačnosti motora
J_z	Moment zotrvačnosti zát'aže
HMI	Human Machine Interface
SVC	Sensorless Vector Control
FVC	Full Vector Control
PWM	Pulse Width Modulation
PLC	Programmable Logic Controller
SCADA	Supervision Control and Data Acquisition
IO	Input Output
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
ETA	CIA402 State Register
CMD	Command Register
SLP	Slip Compensation
LBA	Load Sharing
LBC	Load Correction
LBC1	Correction Minimal Speed
LBC2	Correction Maximal Speed
LBC3	Torque Offset
LBF	Sharing Filter
MSCM	Master/Slave Communication Mode
MSID	Master/Slave ID
MSSN	Master/Slave Number of Slaves
MLTO	MultiDrive Link Communication Timeout
TLIG	Generative Torque Limitation

1 Úvod

1.1 Súčasný stav

V súčasnosti sa v priemysle, pri automatizačných procesoch, pri riadení technologických alebo výrobných liniek využívajú HMI systémy, predovšetkým vo forme vizualizačných systémov. Tento systém je rozhraním zobrazujúcim dáta daných procesov v reálnom čase a odosielať pokyny do ďalších procesov. Za týmto systémom je zvyčajne riadiaci systém, ktorý najčastejšie pozostáva z programovateľného logického automatu, avšak pokyny môžu byť odosielať do zariadení priamo a teda riadiaca logika je implementovaná už v HMI systéme.

Pokyny sú vo väčšine prípadov odosielať do frekvenčných meničov, ktoré dnes napájajú takmer všetky regulované pohony. Dôvodom ich rozsiahleho použitia je široký rozsah riadenia a možností pre rôzne druhy elektrických motorov. Menič musí byť z nadradeného systému nakonfigurovaný na napájaný stroj alebo skupinu strojov a následne môže prijímať príkazy odpovedajúce konkrétnym požiadavkám kladeným na pohon.

V mnohých aplikáciách dochádza k problému z nedostatku miesta pre pohon sústavy z dôvodu vysokého potrebného výkonu a tak je často nutné pristúpiť k spolupráci viacerých motorov pracujúcich do jednej záťaže. Tieto motory môžu byť spojené flexibilnou alebo pevnou väzbou. Spolupráca týchto motorov musí fungovať správne, aby boli motory rovnako percentuálne využité a aby za žiadnych okolností nepracovali proti sebe. V prípade pevnej väzby musí byť regulácia a spolupráca motorov obzvlášť presná.

Pre zdieľanie momentu motormi poskytujú v súčasnosti meniče viacero funkcií, každá s rôznymi výhodami a nevýhodami a oblasťou využitia, preto je potrebné poznať ako jednotlivé metódy fungujú. Pre správne pochopenie sú nutné vedomosti z oblasti elektrických strojov, frekvenčných meničov a ich aplikačných funkcií. V rámci širokej škály výrobcov a typov meničov nie je jednoduché zorientovať sa pri konfigurovaní pohonov pre ich optimálne využívanie.

V priemysle sa taktiež vyskytujú rôzne druhy záťaže v závislosti od danej aplikácie. Tieto záťaže sa v jednoduchších prípadoch v čase nemenia, no vo väčšine prípadov je potrebné uvažovať so zmenami so zmenou otáčok, prípadne inými veličinami. Napríklad pri lisovacích zariadeniach je z pohonu krátkodobu odoberaný veľký výkon a moment motora sa mení skokovo. Preto je potrebné mať vedomosť o tom, ako sa viacmotorový systém môže správať pri dynamicky sa meniacej záťaži a ako zabezpečiť stabilitu takéhoto systému.

Všetky tieto poznatky potom slúžia k správne mu výberu pohonov pre konkrétne aplikácie, pre ich optimálnu spoluprácu a efektívne využitie funkcií, ktoré dnešné meniče ponúkajú.

1.2 Formulácia úlohy a ciele práce

Cieľom tejto práce bolo:

- vytvoriť teoretický popis jednotlivých zariadení a ich súčastí vo viacmotorovej sústave pre zdieľanie momentu
- spracovať popis možností meničov Altivar Process rady 900, popis ich jednotlivých aplikačných funkcií a ich vplyv na správanie pohonu
- namerať a zdokumentovať vplyv niektorých aplikačných funkcií meničov Altivar Process na asynchrónnom motore o výkone 5,5 kW
- opísať metódy zdieľania momentu viacerými motormi napájanými meničmi Altivar Process ATV930 a spôsob ako nakonfigurovať meniče pre dané metódy
- konfigurovať meniče pre jednotlivé možnosti zdieľania momentu a priniesť konkrétne výsledky a porovnanie jednotlivých možností
- vytvoriť vizualizáciu pre operátorský panel HMIDID7DT0, ktorá je schopná riadiť viacmotorovú sústavu, meniť spôsob zdieľania momentu, konfigurovať meniče, simulovať rôzne typy záťaže a zobrazovať informácie o veličinách pohonov v reálnom čase
- zhodnotiť dosiahnuté výsledky, poukázať na výhody a nevýhody jednotlivých metód a určiť optimálnu oblasť využitia konkrétnej metódy

Cieľom tejto práce nebolo:

- zaoberať sa matematickým modelom asynchrónneho motora v súvislosti s vektorovým riadením pomocou frekvenčného meniča
- vytvoriť detailný matematický popis viacmotorovej sústavy uvažujúci všetky mechanicky flexibilné spojenia v sústave
- zaoberať sa vnútornými regulačnými pochodmi v meničoch
- zvládnuť pokročilé programovanie v Cicode Editore pre vytvorenie vizualizácie

2 Asynchrónny motor

Asynchrónny stroj je v súčasnosti jedným z najčastejšie používaných strojov v priemysle. Jeho hlavnou výhodou je najväčšia jednoduchosť spomedzi elektrických strojov, ktorej následkom je aj najnižšia cena, vysoká spoľahlivosť a minimálna potreba údržby. V minulosti sa indukčný stroj používal hlavne v neregulovaných pohonoch, ale postupne sa využíva aj na náročnejšie regulačné účely kvôli rozvoju výkonovej elektroniky.

2.1 Princíp činnosti, konštrukcia stroja

"Princíp asynchrónneho stroja je založený na vzájomnom pôsobení točivého magnetického poľa statoru a prúdov v rotore, ním indukovaných." [1] Z elektrického hľadiska je asynchrónny motor transformátor zložený zo statorovej časti, ktorá predstavuje primárne vinutie transformátora a rotorovej časti, ktorá predstavuje sekundárne vinutie. Rozdiel oproti skutočnému transformátoru je, že vinutia motora sú uložené na rôznych jadrách oddelených vzduchovou medzerou a sekundárne vinutie – rotor je otáčavý. [2]

Vo vzduchovej medzere sa pri pripojení statorového vinutia na harmonické napätie vytvára točivé magnetické pole. To indukuje v rotore stroja napätie dané zmenou spriahnutého magnetického toku v čase

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

Ak je sekundárne vinutie vodivo spojené, tak ním tečú indukované prúdy, ktoré vytvárajú tzv. Lorentzovu silu

$$F = B \cdot I \cdot l, \quad (2)$$

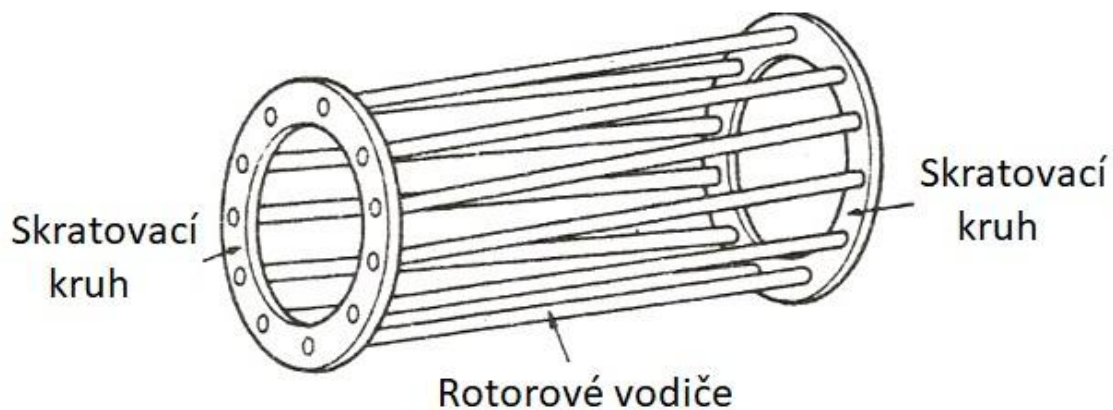
kde B je magnetická indukcia magnetického poľa, v ktorom je vodič, I je prúd tečúci vodičom a l je dĺžka vodiča.

Táto sila uvádza motor do pohybu a je zrejmé, že čím sú indukované prúdy menšie, tým menšia sila pôsobí na rotor. V rotore sa teda indukuje napätie, len kým jeho vinutie pretína magnetické siločiaru poľa a teda len kým sa rotor otáča menšou rýchlosťou ako rýchlosť poľa. Motor tak má nenulový moment, len pri rýchlosti rôznej od synchronnej, zaostáva za točivým magnetickým poľom a teda je to asynchrónny stroj.

Stator asynchrónneho stroja pozostáva z vinutí uložených v drážkach v prstenci z oceľových plechov. Tieto plechy majú minimálnu šírku, aby zabráňovali vzniku vírivých prúdov a znižovali straty v magnetickom obvode. „Vinutie býva vo väčšine prípadov dvojvrstvé s

ohľadom na rozloženie elektromagnetického poľa. Najčastejšie býva vyhotovené z medeného vodiča, izolované lakom. Konce vinutí sú vyvedené na svorkovnicu.“ [3]

Rotor je taktiež zložený z ocelových plechov, v ktorom je trojfázové vinutie vyvedené na krúžky alebo vinutie, ktorého vodiče sú na koncoch vodivo spojené. Krúžkové motory sa v súčasnosti už využívajú v menšom množstve, pretože ich hlavnou výhodou bolo zníženie záberného prúdu pripojením rotorových odporníkov, čo sa v súčasnosti už jednoducho rieši rozbehom frekvenčnými meničmi. Rotory s vinutím nakrátko sa nazývajú aj klietkové rotory a nevyžadujú takmer žiadnu údržbu. Motory použité pri tejto práci boli asynchrónne motory s kotvou nakrátko.



Obr. 1 Vzhľad vodičov rotora asynchrónneho motora s kotvou nakrátko [4]

„Kotva nakrátko je pre veľké motory vyhotovená z medených tyčí, ktoré sú na čelách skratované. Malé motory majú kotvy nakrátko vyhotovenú z hliníka liatím. Pri odlievaní sa na jednej strane obvykle vytvoria aj lopatky ventilátora.“ [3]

2.2 Napät'ové rovnice, náhradná schéma, sklz asynchrónneho motora

Pre stator a rotor asynchrónnych strojov platia nasledujúce napät'ové rovnice:

$$\widehat{U}_1 = R_1 \widehat{I}_1 + jX_{1\sigma} \widehat{I}_1 + \widehat{U}_{11} \quad (3)$$

$$\widehat{U}_2 = 0 = R_2 \widehat{I}_2 + jX_{2\sigma} \widehat{I}_2 + \widehat{U}_{12} \quad (4)$$

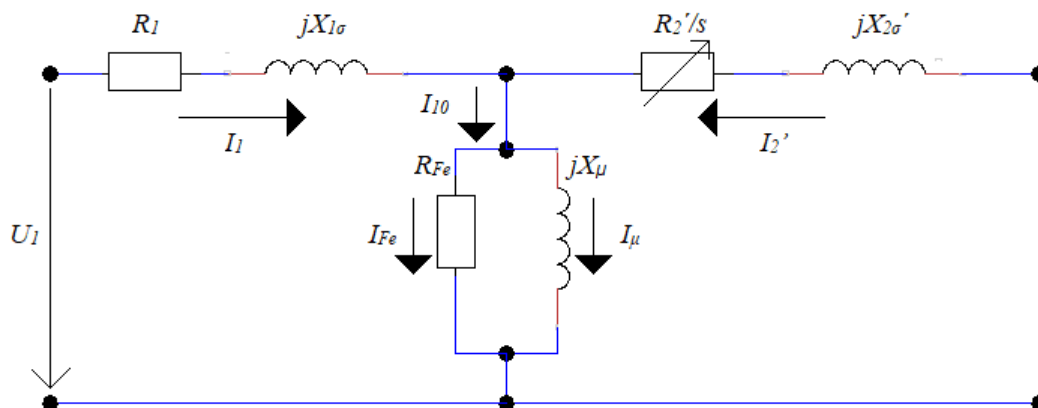
Vynásobením rotorovej rovnice členom p/s a jej upravením je rotorová napät'ová rovnica:

$$0 = \left(\frac{p^2 R_2}{s} + j \frac{\omega_2}{s} p^2 L_{2\sigma} \right) \frac{\widehat{I}_2}{p} + \frac{p}{s} \widehat{U}_{12} \quad (5)$$

a teda:

$$0 = \left(\frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma'} \right) \widehat{I}_2' + \widehat{U}_{11} \quad (6)$$

Náhradná schéma asynchrónneho stroja je veľmi podobná náhradnej schéme transformátora s rozdielom, že odpor sekundárneho vinutia pri indukčnom stroji závisí na sklze. Pri klieťkovom rotore je napätie U_2 rovné nule, pretože vodiče rotora sú skratované.



Obr. 2 Náhradná schéma asynchrónneho motora s kotvou nakrátko

Na Obr. 2 predstavujú R_1 a $X_{1\sigma}$ odpor a rozptylovú reaktanciu statora, R_2' a $X_{2\sigma}'$ sú odpor a rozptylová reaktancia rotora prepočítaná na stator, R_{Fe} je odpor železa a X_{μ} je hlavná (magnetizačná) indukčnosť. Prúd statora I_1 sa delí na prúd tečúci strednou vetvou I_{10} a prúd rotora I_2 . Prúd I_{10} sa skladá z prúdu reprezentujúceho straty v železe I_{Fe} a magnetizačného prúdu I_{μ} .

V podkapitole 2.1 bolo vysvetlené, prečo asynchrónny motor nebeží na synchronnej uhlovej rýchlosti. Veličina s sa nazýva sklz asynchrónneho motora a zohľadňuje rýchlosť otáčavého magnetického poľa statora oproti rýchlosti rotora:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_m}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{f_2}{f_1} \quad (7)$$

Veličina ω_2 je sklzová rýchlosť stroja. [3]

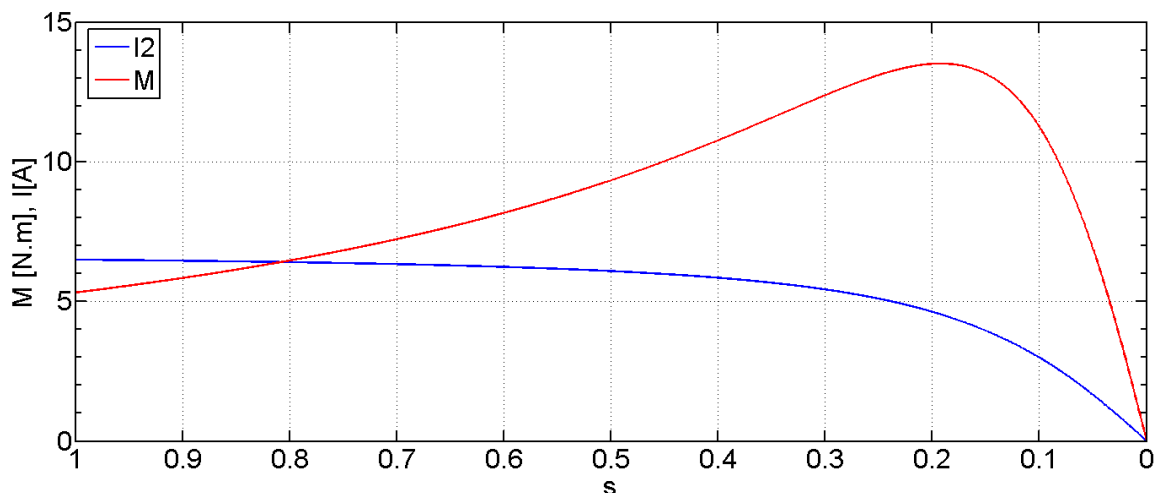
2.3 Moment asynchrónneho stroja

Odvedenie momentu asynchrónneho stroja vychádza z výkonu vo vzduchovej medzere, ktorého súčasťou sú elektrické straty v rotore a mechanický výkon rotora. Po prepočítaní rotorových veličín na stator je výkon vo vzduchovej medzere pre trojfázový motor:

$$P_{\delta} = 3 \frac{R_2'}{s} I_2'^2 \quad (8)$$

Moment trojfázového motora je tak bez uvažovania Hopkinsonovho komplexného činiteľa vo všeobecnosti daný ako

$$M_i = \frac{3 R_2'}{\omega_1 s} I_2'^2 = \frac{3 R_2'}{\omega_1 s} \frac{U_1^2}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2} \quad (9)$$



Obr. 3 Prúd rotora a moment asynchrónneho stroja

Sklz, pri ktorom je moment motora maximálny sa nazýva sklz zvratu. Ten je daný:

$$s_{zv} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} \quad (10)$$

Časť mechanickej charakteristiky napravo od sklzu zvratu sa nazýva pracovná respektíve stabilná oblasť. Motory o vyšších výkonoch majú strmšiu pracovnú časť charakteristiky a teda aj menší sklz zvratu. Oblasť s vyšším sklzom ako sklz zvratu sa nazýva nestabilná oblasť a motor sa v nej nachádza len počas rozbehu a pri zastavovaní motora.

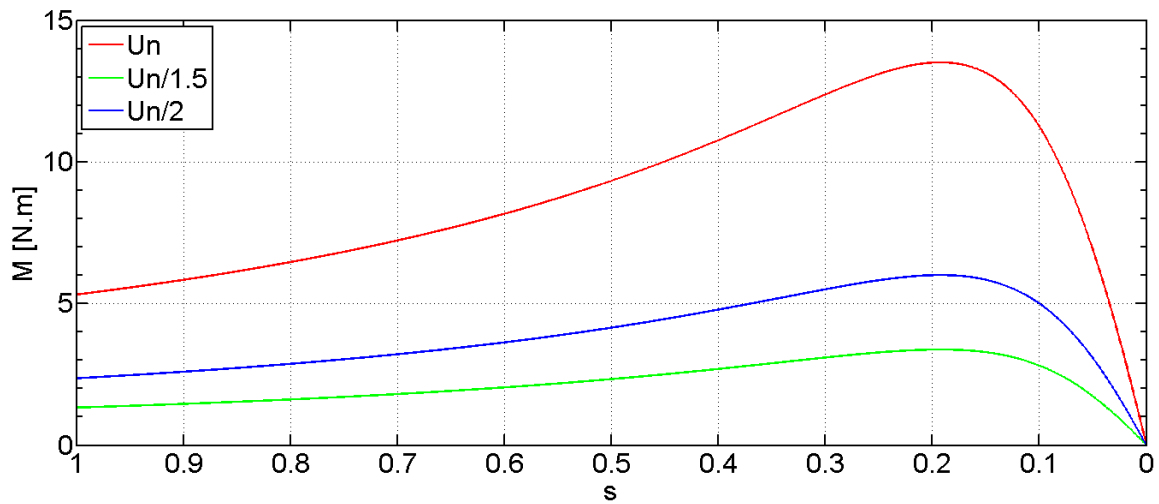
Najčastejším spôsobom rozbehu, ako aj riadenia rýchlosti motorov je v súčasnosti pomocou frekvenčného meniča. [1] Dôvodom je, že záberný prúd motoru pri štarte nadobúda 4-8 násobok nominálnej hodnoty a frekvenčné meniče ponúkajú množstvo ďalších regulačných možností. Priamo na sieť je možné pripájať len motory s malým výkonom do niekoľko kW, ktoré

majú relatívne vysoký sistorový a rotorový odpor a prúd tak nie je kriticky vysoký, prípadne použitie rozbehu hviezda-trojuholník.

2.4 Zmena mechanickej charakteristiky pri zmene parametrov

Zo vzťahu pre moment asynchronného stroja vyplýva, že moment je závislý na napájacom napätí, na sistorovej frekvencii a elektrických konštantách motora. U krúžkových motorov je možná zmena rotorového odporu, u klieťkových rotorov je táto hodnota konštantná a preto sa jej zmena neuvažovala.

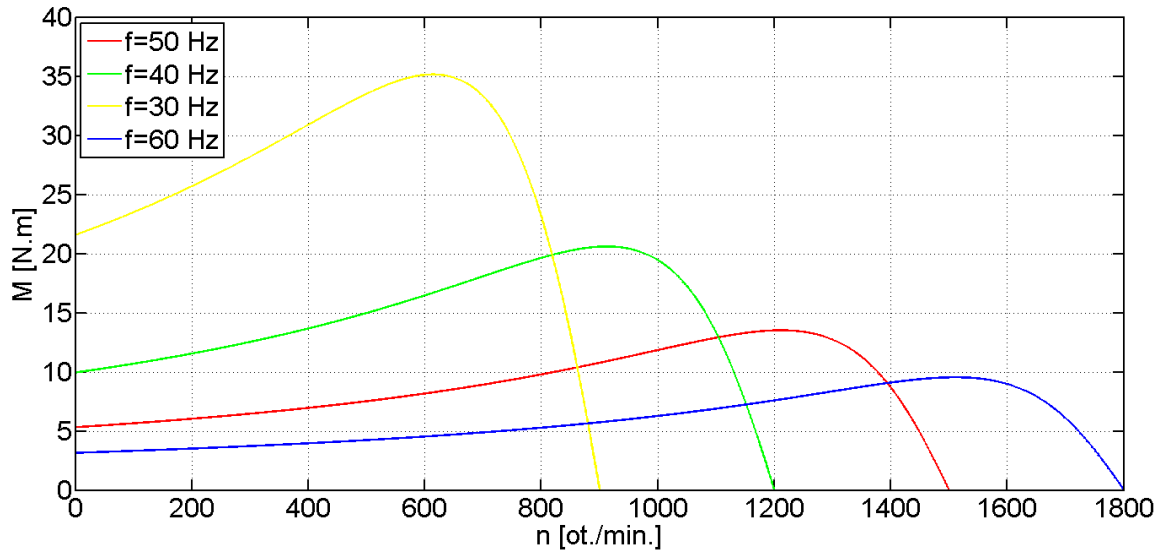
a) Zmena napájacieho napätia:



Obr. 4 Mechanické charakteristiky pri zmene napájacieho napätia

Moment asynchronných motorov sa mení s druhou mocninou napätia a teda, ak by bolo napätia sistora znížené n -krát, moment by sa znížil n^2 -krát. Z tohto dôvodu je dôležité kompenzovať alebo znižovať úbytky napätia na prívodoch a svorkách motorov.

b) Zmena vstupnej frekvencie:



Obr. 5 Mechanické charakteristiky pri variabilnej frekvencii napájacieho napätia

Znižovaním vstupnej frekvencie pri konštantnom napätí by sa dosahovali vyššie záberné momenty a taktiež vyššie momenty zvratu. Pri takejto zmene je však magnetický obvod motora silne presycovaný, keďže magnetizačná reaktancia je daná

$$X_{\mu} = 2\pi f L_{\mu} \quad (11)$$

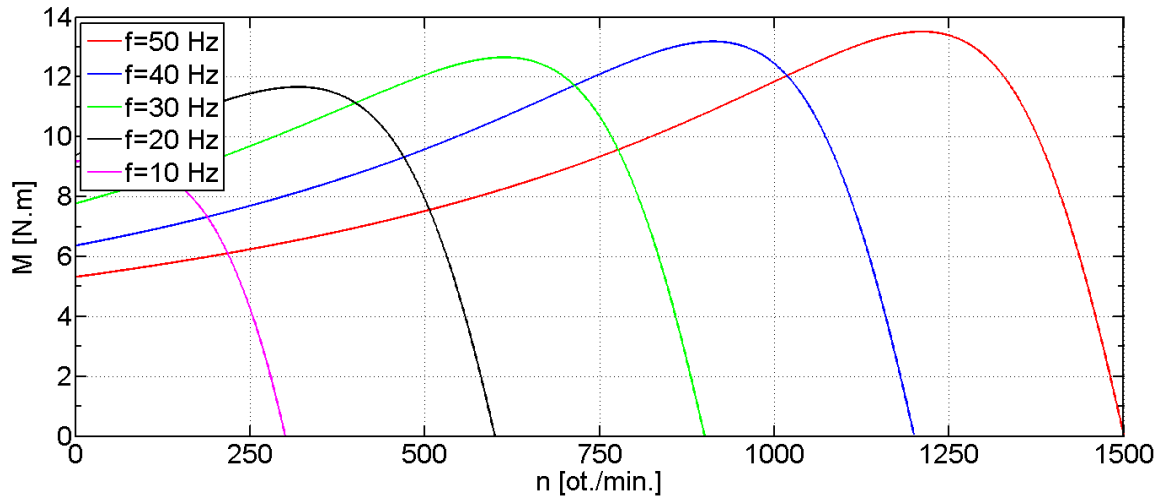
a magnetizačný prúd je teda

$$I_{\mu} = \frac{U_1}{2\pi f L_{\mu}} \quad (12)$$

Na udržanie konštantného magnetického toku stroja je tak potrebné udržiavať pomer napätia a frekvencie konštantný.

Zvyšovaním vstupnej frekvencie je možné pracovať v motorickom režime stroja aj pri vyšších ako nominálnych synchronných otáčkach. Stroj tak ale nie je plne budený a tak je jeho moment znížený.

c) Zmena v pomere U/f =konšt:



Obr. 6 Mechanické charakteristiky pri zmene parametrov napájacieho napätia pri dodržaní U/f =konšt.

Pri udržaní konštantného magnetického toku strojom sa momentová charakteristika môže posunúť smerom k nulovým otáčkam tak, že stroj od začiatku môže pracovať v stabilnej časti charakteristiky a postupným zvyšovaním napätia a frekvencie sa dostane do optimálneho pracovného bodu. Zvyšovanie napätia a frekvencie pri konštantnom toku je dlhodobo možné iba po nominálnu hodnotu napätia. Vyššie hodnoty napätia by pri zachovaní podmienky $U/f = \text{konšt.}$ znižovali životnosť motora a hrozilo by jeho tepelné preťaženie.

2.5 Skalárne riadenie

Skalárne riadenie rýchlosti asynchrónneho motora vychádza z princípov uvedených v 2.4 a zvykne sa nazývať aj frekvenčné riadenie. „Pre zachovanie stáleho spriahnutého magnetického toku Ψ_1 motoru je potrebné udržiavať stály pomer U_1/f_1 .“ [5] Motoru tak teoreticky zostane maximálny moment M_m . Pri tomto uvažovaní sa však zanedbávajú úbytky napätia na statore, kvôli predpokladu

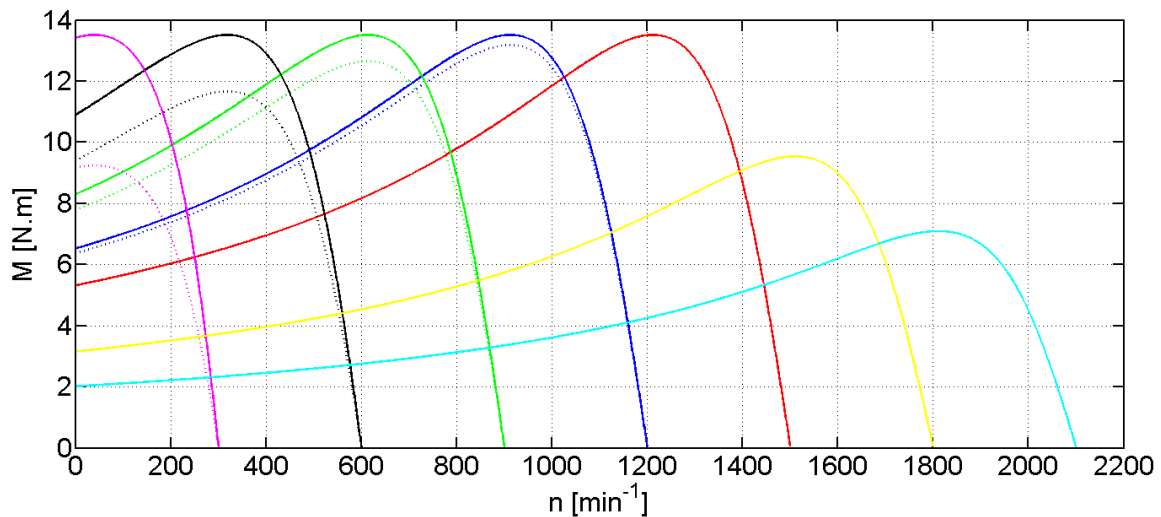
$$X_\mu \gg |R_1 + jX_1| \quad (13)$$

Pri nižších frekvenciách je však magnetizačná reaktancia X_μ nižšia a pomer

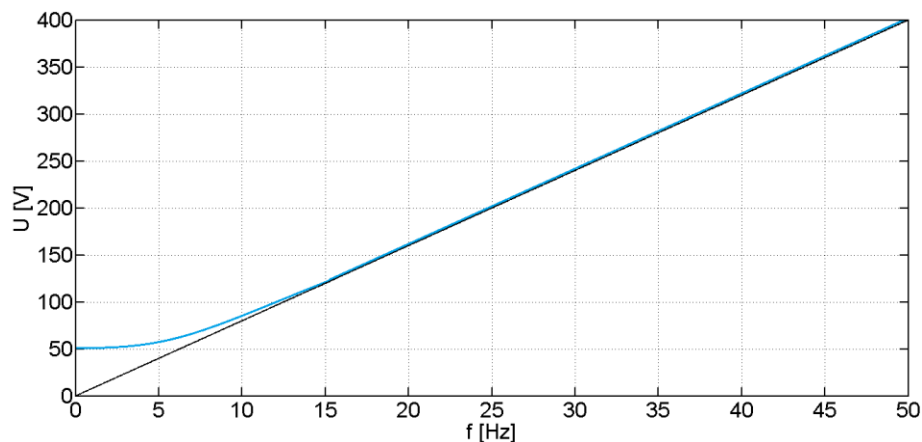
$$\frac{R_1}{2\pi f_1 L_\mu} \quad (14)$$

začne narastať, takže satorové napätie je nutné upraviť korekčným faktorom K_f : [6]

$$\frac{U_1}{U_{1N}} = \frac{f_1}{f_{1N}} K_f \quad (15)$$



Obr. 7 Mechanické charakteristiky pri skalárnom riadení s uplatnením korekcie napätia K_f



Obr. 8 Názorný príklad vplyvu korekcie napätia K_f

Oblasť mechanickej charakteristiky do nominálnej frekvencie sa nazýva oblasť s konštantným magnetickým tokom, za nominálnou frekvenciou je oblasť konštantného výkonu. Tento riadiaci rozsah a mechanické charakteristiky sú analogické k jednosmerným motorom.

Riadenie pri konštantom toku umožňuje plné magnetické využitie motora. Hodnotu magnetického toku statoru nie je nutné merať respektíve ju počítať, stačí dodržiavať podmienku (15). Pri riadení s konštantným výkonom klesá maximálny moment s kvadrátom frekvencie napätia. [5]

Všetky grafy mechanických charakteristík v tejto kapitole boli vytvorené výpočtom podľa uvedenej momentovej rovnice (9), prípadne jej modifikácie v programe MATLAB.

2.6 Vektorové riadenie

Frekvenčné riadenie motora vychádza zo statických veličín a vyhovuje iba v ustálených stavoch. Moment motora je vytváraný magnetickým tokom a prúdom rotora, teda dvomi veličinami, ktoré je potrebné udržiavať konštantné. U jednosmerných motorov s cudzím budením je magnetický tok viazaný na stator a jeho veľkosť je jednoducho regulovateľná. U asynchrónnych motorov nakrátko je k dispozícii iba jeden riadiaci vstup, ktorým sa mení zároveň tok aj moment motora. Cieľom vektorového riadenia je tak priblížiť vlastnosti frekvenčne riadeného asynchrónneho motora k riadeniu jednosmerného cudzobudeného motora a nezávisle tak riadiť moment a magnetický tok. [5][6]

Priestorový vektor danej veličiny je vektor, ktorý je určený okamžitými veľkosťami a polohami veličín troch fáz stroja. Priestorový vektor sa z trojfázovej sústavy môže transformovať do:

- systému pevných statorových súradníc α, β
- systému rotorových súradníc d, q otáčajúcich sa mechanickou uhlovou rýchlosťou
- systému súradníc x, y otáčajúcich sa synchronnou uhlovou rýchlosťou

Táto transformácia najprv pozostáva z Clarkovej transformácie 3/2 a následnej Parkovej transformácie pootočením. Clarkovej transformácia prevádza priestorový vektor do súradníc α, β a fyzikálne predstavuje náhradu trojfázového motora dvojfázovým o rovnakom výkone. [6]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

Pokiaľ sa priestorový vektor transformuje do rotorových súradníc, zložka statorového prúdu i_{1d} odpovedá magnetickému toku rotora a zložka i_{1q} momentu motora. V statorových súradniciach je možné vektor prúdu zapísať ako

$$\bar{i} = ie^{j\varepsilon} = i_\alpha + ji_\beta, \quad (17)$$

kde ε je uhol natočenia vektora v týchto súradniciach. V rotorovom systéme je vektor daný ako

$$\bar{i}_R = ie^{j\sigma} = i_d + ji_q \quad (18)$$

a teda

$$\bar{i}_R = \bar{i}e^{j(\sigma-\varepsilon)} = \bar{i}e^{-j\rho}, \quad (19)$$

kde σ je uhol natočenia priestorového vektora vzhľadom na súradnice otáčajúce sa rotorovou uhlovou rýchlosťou ω_m a uhol ρ je daný ako $\varepsilon - \sigma$. Parková transformácia do točivých súradníc rotora tak je

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & \sin \rho \\ -\sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (20)$$

Pokiaľ je zložka statorového prúdu i_{1d} konštantná, stroj má stály magnetický tok. Zmenou veľkosti zložky prúdu i_{1q} sa mení moment stroja, čím sa dosahuje ekvivalentné riadenie ako pri jednosmernom cudzobudenom stroji, kde je veľkosť magnetického toku daná budiacim prúdom statora I_b a veľkosť momentu je riadená rotorovým prúdom I_a . [5]

Riadiace veličiny sa pri vektorovom riadení prepočítajú do požadovaného súradnicového systému a aplikujú sa na konkrétny matematický model asynchrónneho motora. V rámci získania informácie o aktuálnom natočení rotora sa vektorové riadenie rozdeľuje na dve možnosti:

- bezsnímačové vektorové riadenie (Sensorless Vector Control = SVC)
- vektorové riadenie pomocou snímača polohy (Full Vector Control = FVC)

Pri bezsnímačovom vektorovom riadení si riadiaci systém vypočítava aktuálnu hodnotu natočenia rotora z matematického modelu asynchrónneho motora a nevykazuje takú presnosť ako plné vektorové riadenie. Enkóder pri FVC poskytuje presnú informáciu o polohe rotora a regulácia je tak obzvlášť presná.

3 Menič frekvencie

Frekvenčné meniče patria medzi výkonové polovodičové meniče. "Výkonové polovodičové meniče používané v silnoprúdovej elektrotechnike menia elektrickú energiu o určitých parametroch na elektrickú energiu o iných parametroch." [7] V oblasti riadenia pohonov majú nezastúpiteľné miesto, pretože poskytujú široké možnosti regulácie, či už jednosmerných alebo striedavých motorov.

3.1 Princíp fungovania

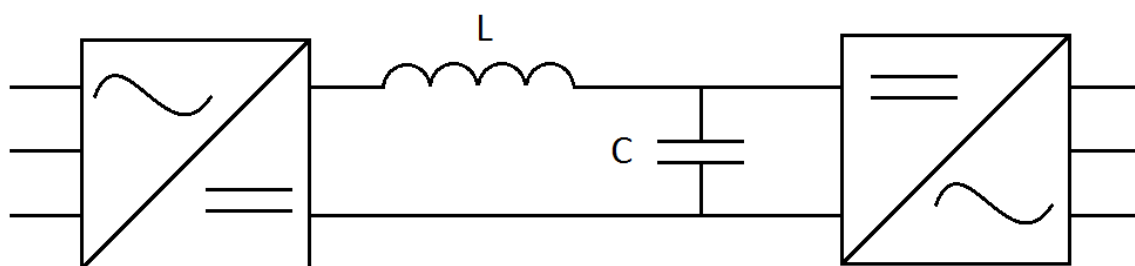
Frekvenčné meniče menia vstupné napätie o istej efektívnej hodnote a frekvencii na výstupné napätie o požadovanej efektívnej hodnote a frekvencii. Na vstupe takýchto meničov je buď riadený alebo neriadený usmerňovač, podľa typu meniča jednosmerný medziobvod a striedač na výstupe. Meniče frekvencie sa delia na dve základné skupiny:

- nepriame meniče frekvencie
- priame meniče frekvencie

Priame meniče frekvencie alebo cyklokonvertory sa skladajú z riadeného usmerňovača na vstupe a striedača na výstupe bez jednosmerného obvodu a výstupné striedavé napätie sa tak skladá z úsekov pôvodného sínusového napätia.

Nepriame meniče frekvencie majú na vstupe riadený alebo neriadený usmerňovač, jednosmerný medziobvod napäťového alebo prúdového charakteru a striedača. Použitý menič bol nepriamy frekvenčný menič.

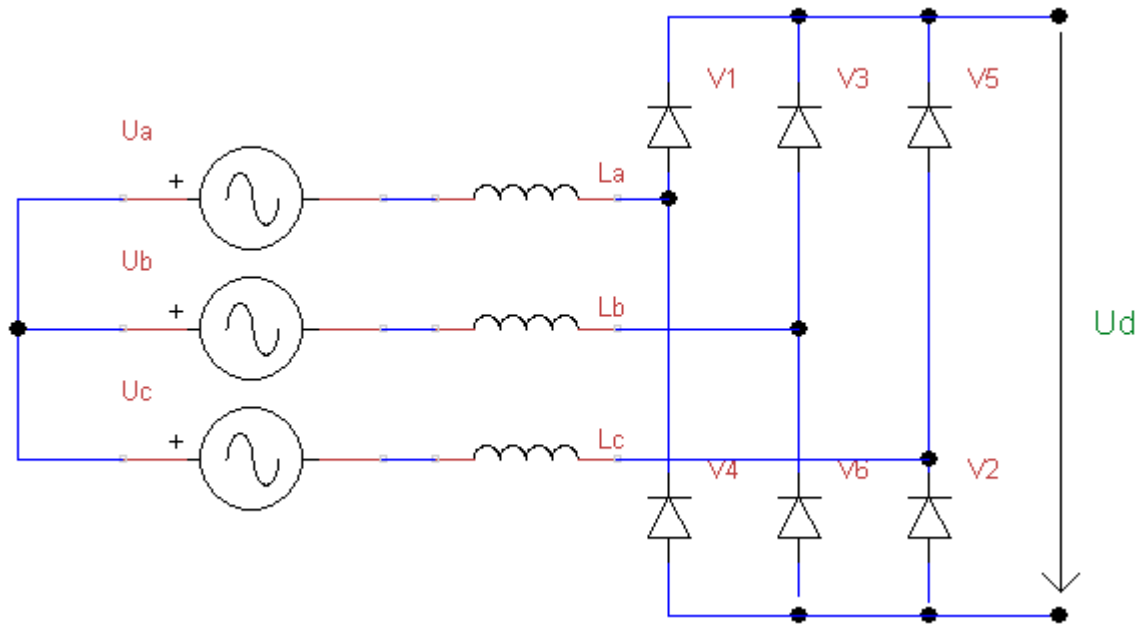
3.2 Nepriame frekvenčné meniče



Obr. 9 Schéma nepriameho frekvenčného meniča

Na vstupe frekvenčného meniča je najčastejšie neriadený 6-pulzný usmerňovač v mostíkovom zapojení. V súčasnosti sa tento usmerňovač používa vo veľkom rozsahu, kvôli

nízkemu zvlneniu jednosmerného napätia a taktiež neprítomnosti tretej harmonickej a jej násobkov u vstupného prúdu. [8]



Obr. 10 Schéma neriadeného usmerňovača

Za usmerňovačom sa nachádza jednosmerný medziobvod, ktorý pozostáva z tlmiviek alebo kondenzátorov, prípadne z oboch komponentov. V prípade prúdového striedača je medziobvod tvorený tlmivkami, u napätového striedača kondenzátormi pre vyhladenie usmerného napätia. Použitý menič obsahuje napätový medziobvod a napätový striedač.

Medziobvod je často tvorený dvomi kondenzátormi s napätím $U_d/2$ a vyvedeným bodom medzi nimi ako neutrálnym bodom. Súčasťou medziobvodu bývajú aj nabíjacie rezistory, kvôli obmedzeniu prúdovej špičky pri nabití vybitého kondenzátora.

Za jednosmerným medziobvodom sa nachádza napätový striedač. V súčasnosti sa v rôznych aplikáciách využívajú 2 druhy striedačov:

- PWM striedače - striedače riadené pulzne-šírkovou moduláciou
- Viacúrovňové striedače (Multilevel Inverters) - predovšetkým s upínacími diódami alebo plávajúcimi kondenzátormi

Viacúrovňové striedače dokážu pripojiť na výstupné svorky napätie rôznych veľkostí podľa počtu úrovní striedača. Výstupné napätie a prúd sa vyznačujú nízkym pomerom vyšších harmonických, ale za cenu viacerých súčiastok a zložitejšieho riadenia.

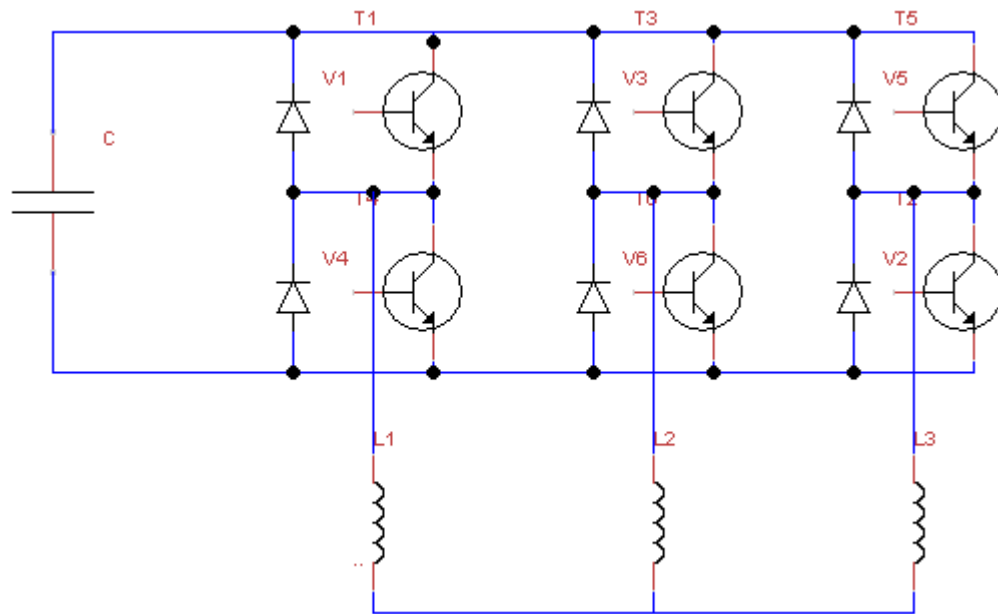
Trojfázové PWM striedače sa skladajú zo 6 vypínateľných polovodičových súčiastok, často IGBT tranzistorov a 6 spätných diód. Tranzistory sú spínané metódou široko impulznej modulácie, tak aby v jednej vetve vždy viedol iba jeden tranzistor, aby nedošlo ku skratu

kondenzátoru a aby bol na výstupe takmer sínusový priebeh prúdu. Použitý striedač je striedač PWM typu.

Podľa spôsobu spínania tranzistorov sa PWM striedače delia na:

- unipolárne: napätie fázi môže byť $+U_d/2$, 0 , $-U_d/2$, nižší obsah vyšších harmonických
- bipolárne: napätie fázi môže byť $+U_d/2$, $-U_d/2$, vyšší obsah vyšších harmonických, vyžaduje bezpečnostné pauzy medzi spínaním tranzistorov tej istej vetvy, aby nedošlo ku skratu kondenzátora medziobvodu

Za striedačom je pripojené trojfázové vinutie motora zapojené buď do hviezdy alebo trojuholníka.



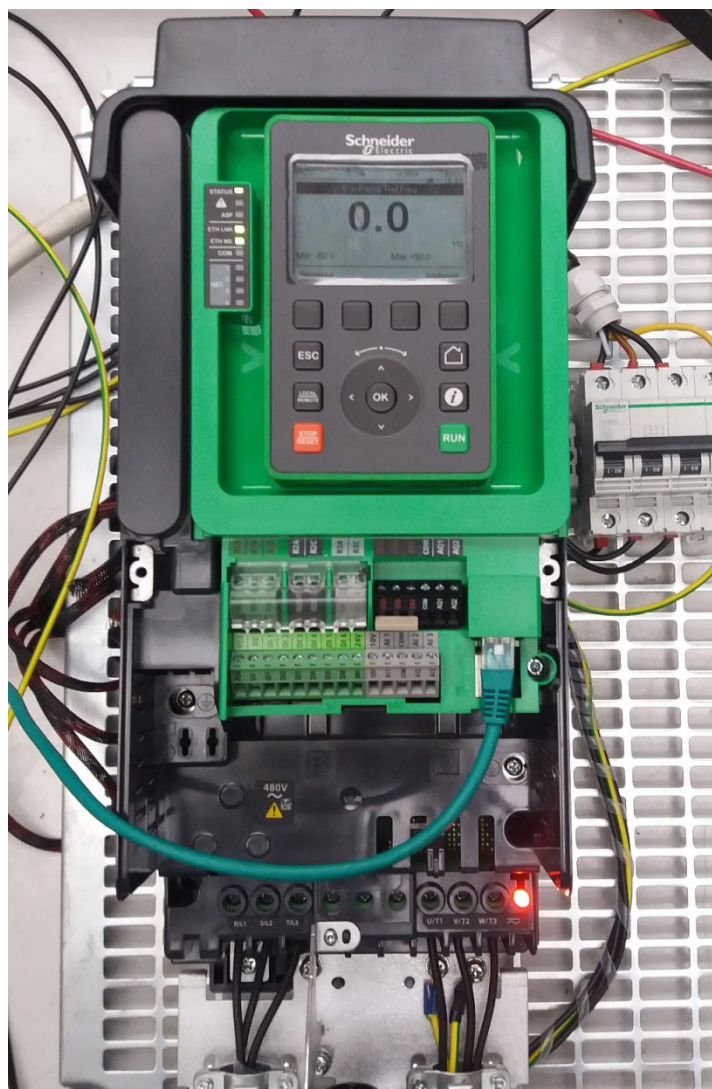
Obr. 11 Schéma výstupného striedača frekvenčného meniča

Pri riadení striedača pulzne šírkovou moduláciou sa pulzy na hradle tranzistorov generujú na základe porovnávania modulačného napätia s nosným signálom o konštantnej frekvencii. Tento nosný signál môže mať charakter pílovitý, trojuholníkový a pod. V momente, keď má riadiace napätie vyššiu hodnotu ako nosný signál, je tranzistor zopnutý a fáza je pripojená ku kladnej svorke kondenzátora medziobvodu.

3.3 Riadenie pomocou meniča AltivarProcess ATV 930

Na testovacom zariadení v Schneider Electric boli použité meniče typu AltivarProcess ATV930. Sú to nepriame frekvenčné meniče so striedačom riadeným pulzne šírkovou moduláciou. Tento menič poskytuje vektorové bezsnímačové alebo plne uzavreté riadenie pomocou snímača polohy.

Tieto meniče patria medzi najmodernejšie meniče a obsahujú okrem výkonovej časti aj rôzne ďalšie nevyhnutné komponenty, ako napr. spomenuté nabíjacie rezistory pre kondenzátory medziobvodu, riadiace jednotky, vlastné zdrojové jednotky pre napájanie 24 V, meracie rezistory pre prúdy, chladiče a taktiež komunikačné jednotky. K jednosmernému medziobvodu bolo možné pripojiť brzdné rezistory, aby sa v nich mohla mariť energia pri brzdení.



Obr. 12 Vzhľad meniča Altivar Process ATV930

4 Mechanika motorov

Pohybová rovnica rotačného pohonu je všeobecne daná:

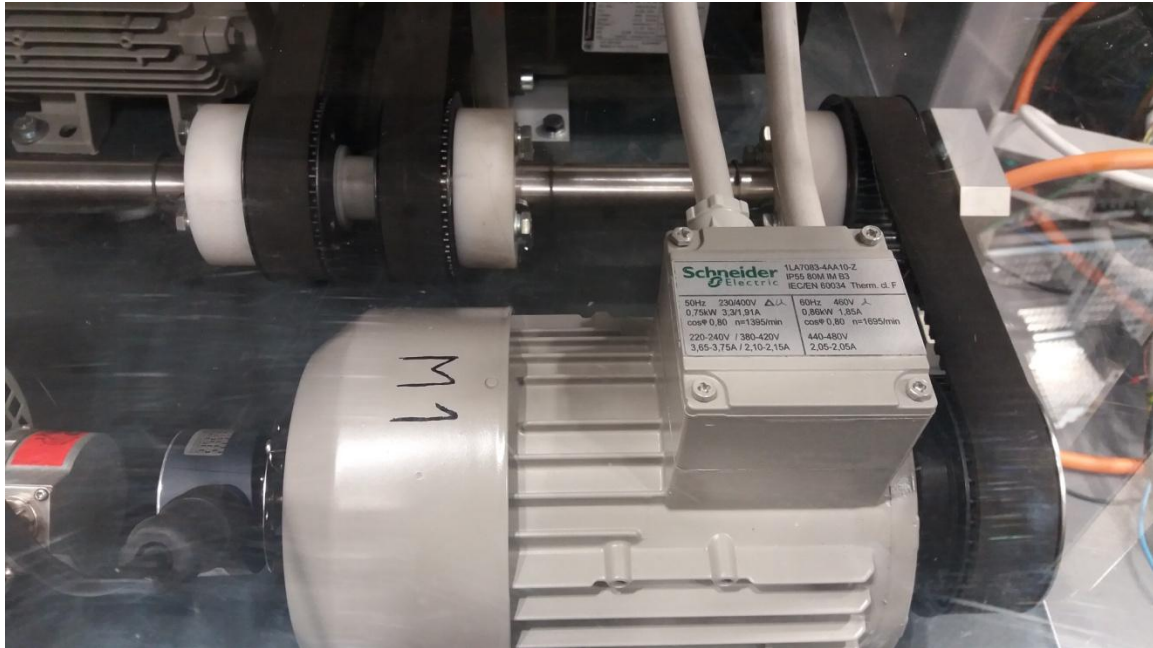
$$M_m - M_z = M_a = (J_m + J_z) \frac{d\omega}{dt}, \quad (21)$$

kde M_m je moment motora, M_z je moment záťaže, M_a je dynamický moment, J_m a J_z sú momenty zotrvačnosti motora a záťaže a ω je uhlová rýchlosť motora. Moment M_z bol vytváraný motorom o väčšom výkone a simuloval rôzne typy záťaže, ako napríklad konštantnú, záťaž so skokovými zmenami, ventilátorovú a podobne.

V rámci viacmotorových sústav sa rozlišujú spojenia medzi motormi na pevné (rigid connection) a flexibilné. Príkladom pevnej väzby je napríklad žeriav, ktorý má zdvíhať záťaž otáčaním hriadeľu, na ktorého koncoch sú dva motory. Tieto motory sú pevne mechanicky spojené a majú rovnakú rýchlosť. Za pevnú väzbu sa považuje aj spojenie pomocou prevodovky. O flexibilnej väzbe je možné hovoriť napríklad v prípade dlhších dopravných pásov, na ktorých koncoch sú motory. Pokiaľ jeden z motorov o trochu pridá v rýchlosti, nastane stav odpovedajúci mechanickým vlastnostiam pásu. Dá sa očakávať, že v takom prípade sa pás trochu napne a urýchli druhý motor.

V tomto prípade boli momenty všetkých motorov prenášané na jeden hriadeľ pomocou ozubených remeňov bez prevodovky, keďže všetky motory boli 4-pólové. Kompletný popis takéhoto systému je sústavou štyroch diferenciálnych rovníc. Pri rýchlych zmenách záťažného momentu by sa vplyv pružného spojenia hnacích motorov a hriadeľu prejavil podľa fyzikálnych konštánt tlmenia a pružnosti daných remeňov. Takýto detailný popis sústavy však nemal opodstatnenie, keďže teoreticky najvyššia vzorkovacia frekvencia vizualizačného systému odpovedala 10 ms (prakticky však okolo 200 ms) a teda rýchlejšie dynamické deje nebolo možné skúmať. Okrem toho šlo o ozubené a nie hladké remene, ktoré boli veľmi krátke a toto spojenie motorov sa dalo považovať za pevnú väzbu. Momentová rovnica tak bez uvažovania vlastností remeňov vyzerala nasledujúco:

$$M_{m1} + M_{m2} - M_z = (J_{m1} + J_{m2} + J_z) \frac{d\omega}{dt} = M_a \quad (22)$$



Obr. 13 Spojenie použitého motora s hriadeľom cez ozubený remeň

Momenty M_{m1} a M_{m2} v sústave boli vytvárané dvomi rovnakými motormi o výkone 0,75 kW a M_z bol vytváraný motorom o výkone 1,5 kW. V ustálenom stave, keď sa rýchlosť sústavy nemení, je dynamický moment a teda súčet momentov motorov nulový.

5 Operátorský panel

Na testovacom zariadení sú frekvenčné meniče riadené z operátorského panelu HMIDID7DT0 s vizualizovanými parametrami, premennými a riadiacimi slovami meničov. Tento panel sprostredkúva komunikáciu medzi človekom a frekvenčným meničom, čím sa zaradzuje medzi HMI systémy.

5.1 HMI systémy

HMI je skratkou pre Human-Machine Interface, teda rozhranie medzi človekom a strojom. HMI systémy pozostávajú z programových a technických prostriedkov, ktoré slúžia na zjednodušenie riadenia technologického systému a na kontrolu a testovanie zásahov obsluhy do riadiaceho systému.

Pojem vizualizácia predstavuje zviditeľňovanie rôznych objektov na úrovni riadiacich a informačných technológií s cieľom vyhodnocovania a rozhodovania. Pre vizualizačné systémy sa ustálila aj skratka SCADA pre Supervision Control and Data Acquisition, teda supervízne riadenie a zber dát. V súčasnosti tvoria SCADA/HMI vizualizačné systémy väčšinu používateľských rozhraní. [9]

Na vizualizačných paneloch alebo obrazovkách sa zobrazujú aktuálne stavy premenných z nadradeného riadiaceho systému cez virtuálne objekty. Riadiacim systémom môže byť frekvenčný menič, alebo častejšie PLC, ktoré spravuje viacero meničov naraz. V priemyselných aplikáciach má operátor k dispozícii informácie o daných procesoch a môže ich diagnostikovať a ovládať so vzdialeným prístupom. [10] HMI rozhranie preto musí byť navrhnuté tak, aby operátorovi boli informácie zobrazené jasne, zrozumiteľne a aby sa dokázal rýchlo a správne rozhodovať.

5.2 Panel HMIDID7DT0

Panel HMIDID7DT0 je operátorský panel s dotykovým LCD displejom. Jeho rozlíšenie je 1024 x 768 pixelov, čo je pomerne nízka hodnota a preto bolo potrebné rozdeliť program na viacero obrazoviek.



Obr. 14 Vzhľad panelu HMIDID7DT0 [11]

5.3 Citect Studio

Vývoj obrazoviek pre riadenie meničov prebiehal v programe Citect studio od firmy Schneider Electric. Tento softvér poskytuje IO server, ktorý si vymieňal informácie s frekvenčnými meničmi a tým umožnil vytvoriť program, ktorý zobrazoval veličiny vo vhodnej forme. Tento program bežal na priemyselnom počítači IPC s operačným systémom Windows v Citect SCADA Runtime. Z operátorského panelu tak bolo možné meniť parametre, riadiť jednotlivé motory, meniť spôsoby zdieľania momentu, zobrazovať trendy a nastavovať nadefinované, v čase sa meniace veličiny ako brzdný moment a referencie otáčok.

Konfigurovanie meničov prebieha zvyčajne buď prostredníctvom grafických terminálov na prednej strane meniča alebo pomocou programu SoMove od Schneider Electric. Cieľom bolo, aby boli motory plne ovládateľné z vyššie uvedeného panelu a preto bolo nutné vybrať všetky parametre meniča, ktoré bolo potrebné meniť a vytvoriť stránku pre ich konfigurovanie. Program Citect Studio je primárne vizualizačný program, ale bolo možné využiť ho aj za týmto účelom.

6 Komunikácia po Ethernete

IO server softvéru Citect Studio, komunikoval s meničom po Ethernete s využitím komunikačného protokolu Modbus TCP.

6.1 Ethernet

Ethernet je v súčasnosti najrozšírenejšia rámcová technológia lokálnych počítačových sietí. Okrem využitia v informačných technológiách sa Ethernet dostal do popredia aj v automatizačných aplikáciách a priemysle. V rámci referenčného modelu OSI Ethernet realizuje fyzickú a linkovú vrstvu.

Ethernetový kábel je dnes tvorený krútenou dvojlinkou a bežne dosahuje rýchlosti medzi 1-10 Gbit/s. [12] Vďaka obrovskému rozšíreniu Ethernetu a pripojiteľnosti rôznych zariadení, Ethernet postupne vytláča z priemyslu predtým používané štandardy.

6.2 Modbus TCP

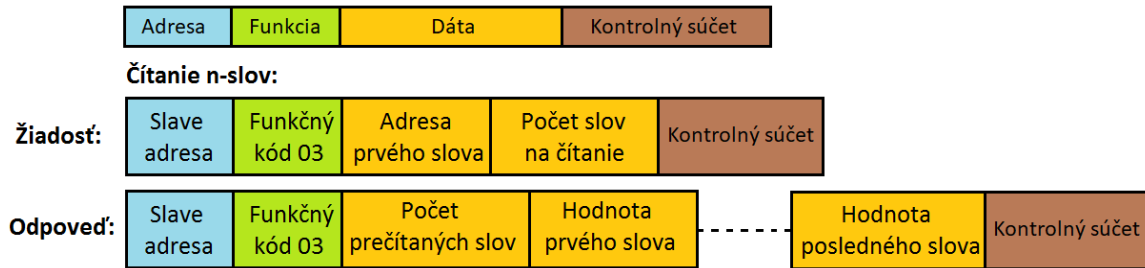
Protokol Modbus bol vyvinutý firmou MODICON ako aplikačný protokol pre spojenie PLC a ďalších nástrojov, preto sa v súčasnosti často označuje ako automatizačný štandard. Modbus funguje na princípe Master – Slave, je nezávislý na fyzickej vrstve a teda môže byť implementovaný používaním rôznych médií. Modbus TCP/IP využíva Ethernet na prenášanie správ. Štruktúra správy Modbusu pozostáva z adresy, funkcie, prenášaných dát a kontrolného súčtu, vid'. Obr. 15.

Slave adresy majú rozsah od 1 do 247. Master v žiadosti posielá adresu konkrétneho Slave, Slave v odpovedi zasiela svoju adresu, aby Master vedel, ktoré zariadenie mu odpovedá.

Funkcia alebo funkčný kód je v rozsahu od 1 po 255 a v žiadosti hovorí, o akú akciu pri komunikácii ide. Master odosiela svoju požiadavku, Slave v bežných prípadoch odpovedá tým istým funkčným kódom, v špeciálnych prípadoch sa nastaví najvýznamnejší bit funkčného kódu na 1.

Dáta v žiadosti predstavujú bližšiu špecifikáciu akcie pre Slave. Môže sa jednať o adresy registrov, množstvo požadovaných dát a podobne. V odpovedi Slave posielá požadované dáta, alebo pri výnimočných udalostiach zasiela kód, ktorým Master rozozná, aká udalosť nastala.

Kontrolný súčet vypočítava a odosiela Master. Ak Slave vypočíta rozdielnu hodnotu súčtu, tak nevytvorí odpoveď pre Mastera.



Obr. 15 Štruktúra správy Modbus-u s príkladom čítania n-slov [13]

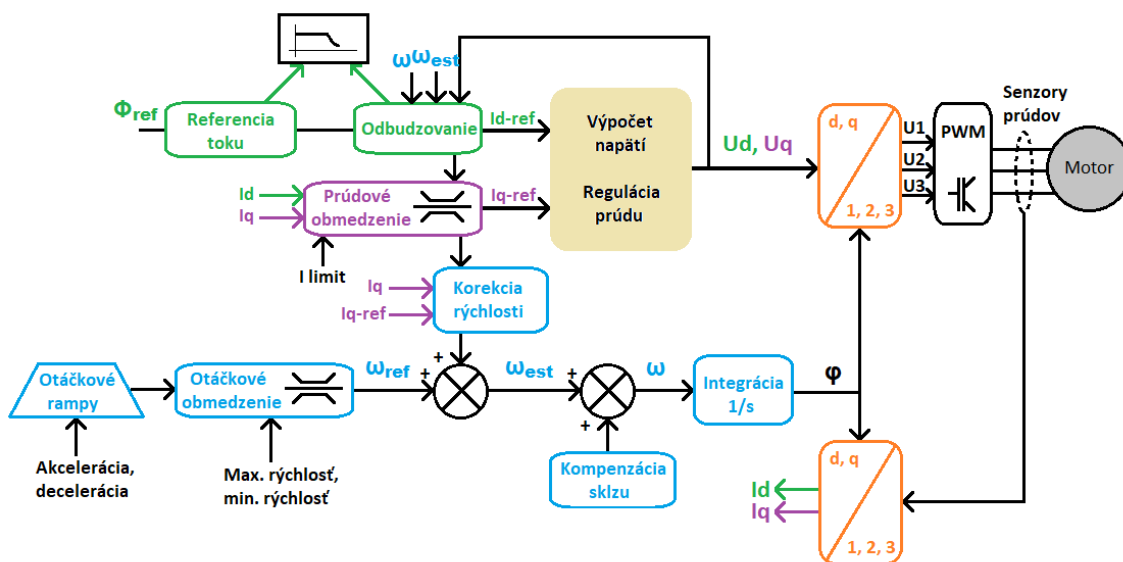
Znalosť štruktúry správy Modbus TCP bola pri tvorení tejto práce potrebná pri hľadaní chýb pri odosielaní a prijímaní dát medzi meničom a IO serverom vizualizácie.

7 Ovládanie meniča Altivar Process ATV930

Menič Altivar Process ATV930 je jedným z aktuálne najnovších meničov od firmy Schneider Electric. Tento menič disponuje skalárnym riadením vysvetleným v 2.5, oboma spôsobmi vektorového riadenia spomenutými v 2.6 a ponúka množstvo ďalších funkcií.

Základnými parametrami pre riadenie motora sú stavový register a riadiaci register. Tie hovoria o celkovom stave meniča a umožňujú základné funkcie ako rozbeh motora, reverzácia a podobne. Menič okrem toho obsahuje viacero ďalších parametrov, ktoré ovplyvňujú riadenie motora. Príkladmi sú kompenzácia sklzu asynchrónneho motora, korekcia záťaže alebo IR kompenzácia. Tieto faktory majú vplyv na správanie sa pohonu a môžu ovplyvňovať rozdelenie momentov medzi motory.

Do regulačnej štruktúry pohonu tak vstupujú mnohé veličiny, ktoré sa dajú používateľom nastaviť. Okrem toho je možné aj meniť jednotlivé konštanty regulátorov meniča, no tieto zmeny neboli pri tejto práci testované. Na Obr. 16 je zjednodušená regulačná schéma vektorového bezsnímačového riadenia tohto meniča. Pri testovaní viacmotorovej sústavy sa predovšetkým využívala táto metóda (SVC VC).



Obr. 16 Regulačná schéma vektorového bezsnímačového riadenia meniča Altivar Process ATV 930

Táto regulačná štruktúra je veľmi všeobecná a neposkytuje skutočný pohľad do vnútorných regulačných procesov. Tie vo väčšine prípadov predstavujú samotný chránený know-how jednotlivých firiem, preto nebolo možné skúmať hlbšie reguláciu meniča.

7.1 Stavový register, Riadiaci register

Stavový register meniča poskytuje základné informácie o aktuálnom stave meniča. Vedomosť o jeho možných stavoch je nutná pre spúšťanie motorov, detekovanie chýb a zastavovanie motorov. Stavový register použitého meniča má skratku ETA.

Tab. 1 Tabuľka bitov stavového registra

Bit 0	1: Pripravený na zapnutie 0: Nepripravený na zapnutie
Bit 1	1: Zapnutý, pripravený (stav „ready“) 0: Vypnutý
Bit 2	1: Operácia povolená, v behu (stav „running“) 0: Operácia nepovolená
Bit 3	1: Detekcia chyby 0: Žiadna chyba
Bit 4	1: Napätie povolené, silová časť pripojená k napájaniu 0: Silová časť nepripojená k napájaniu
Bit 5	1: Rýchly stop je vypnutý 0: Rýchly stop je aktívny
Bit 6	1: Zapnutie nepovolené, výkonová časť napájania zablokovaná 0: Zapnutie povolené
Bit 7	1: Varovanie aktívne 0: Bez varovania
Bit 8	Rezervovaný, vždy 0
Bit 9	1: Príkaz alebo referencia zo zbernice 0: Príkaz alebo referencia zadaná z terminálu displeja
Bit 10	1: Cieľová referencia je dosiahnutá 0: Referencia nie je dosiahnutá
Bit 11	1: Referencia je mimo limít (nízka rýchlosť LSP a vysoká rýchlosť HSP) 0: Referencia je v rámci limitných hodnôt
Bit 12	Rezervovaný, vždy 0
Bit 13	Rezervovaný, vždy 0
Bit 14	1: Stop spustený STOP tlačidlom z terminálu displeja 0: STOP tlačidlo nie je aktívne
Bit 15	1: Reverzné otáčanie na výstupe 0: Otáčanie v kladnom smere na výstupe

Riadiaci register je úzko previazaný so stavovým registrom. Najvýznamnejšie sú hlavne prvé štyri bity riadiaceho registru. Riadiaci register použitého meniča má skratku CMD.

Tab. 2 Tabuľka bitov riadiaceho registra

Bit 0	1: Zapnúť, povel pre spínače
Bit 1	0: Zablokovať napätie
Bit 2	0: Rýchly stop
Bit 3	1: Povolit' operáciu, príkaz Run
Bit 4	Rezervovaný, vždy 0
Bit 5	Rezervovaný, vždy 0
Bit 6	Rezervovaný, vždy 0
Bit 7	Z 0 do 1: Reset chyby.
Bit 8	1: Stop podľa parametru Stt
Bit 9	Rezervovaný, vždy 0
Bit 10	Rezervovaný, vždy 0
Bit 11 to 15	Môžu byť priradené príkazom.

7.2 Spúšťanie motorov

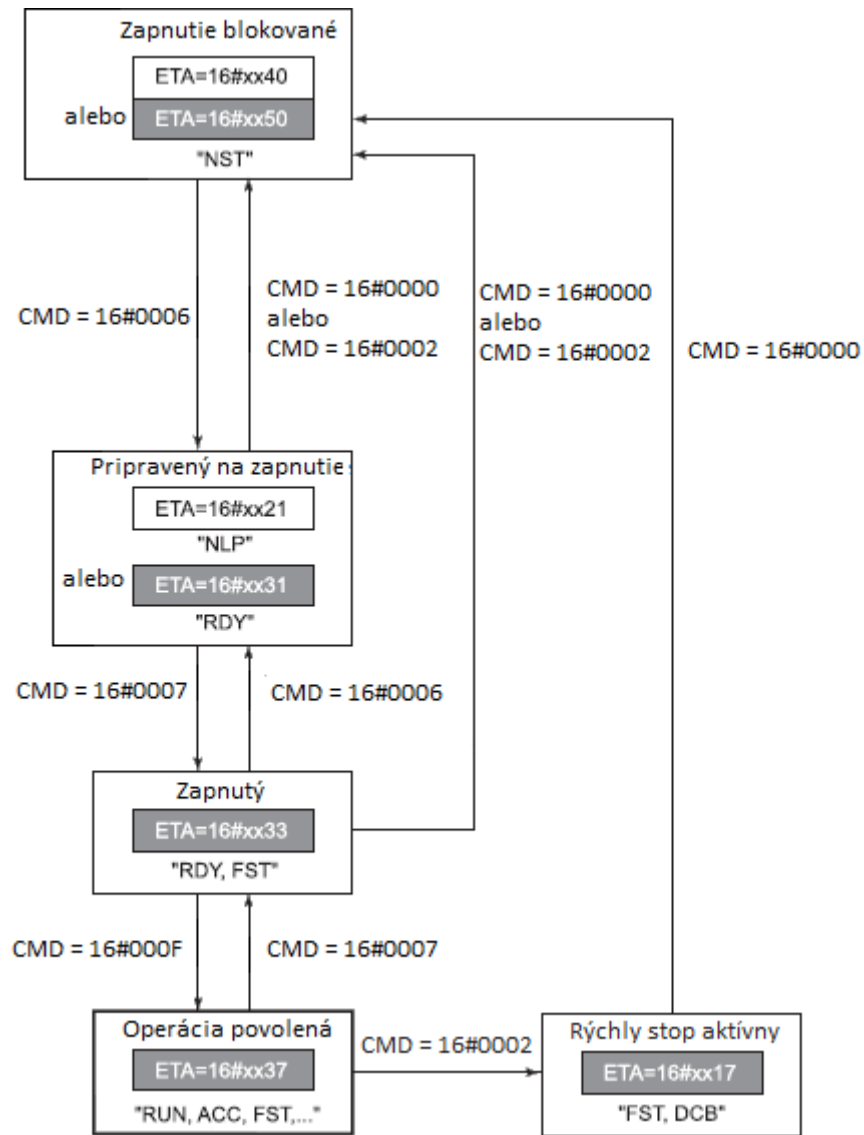
Spúšťanie motorov meničom Altivar Process ATV930 prebieha sekvenciou príkazov meniču pomocou riadiaceho registru na základe stavu, v ktorom sa menič nachádza. Po zapnutí meniča je menič v stave „NST“. Stavový register má hodnotu v hexadecimálnom tvare 16#xx50 alebo 16#xx40 a teda podľa bitov z tabuľky stavového registru má menič zablokovanú silovú časť a buď aktívne alebo neaktívne napájanie. Do riadiaceho slova sa zapíše príkaz 16#0006, v rámci bitov sa jedná o povolenie napätia silovej časti a deaktivácia rýchleho stopu.

Menič sa tým dostane do stavu „RDY“ (ready) alebo „NLP“ (no mains voltage), ak jednosmerný medziobvod ešte nie je nabitý. V stavovom registri je stav RDY reprezentovaný hodnotou 16#xx31 a oproti predchádzajúcemu stavu je zapnutie silovej časti povolené, rýchly stop je vypnutý a menič je pripravený na zapnutie. Stav NLP odpovedá hodnote 16#xx21 a teda zapnutie silovej časti ešte nie je povolené. Do riadiaceho slova sa následne zapíše hodnota 16#0007 a teda príkaz zapnúť pre spínače.

Menič sa dostane do stavu „RDY, FST“ (ready, fast stop) a v stavovom registri má hodnotu 16#xx33. Do riadiaceho slova je potom potrebné zapísať hodnotu 16#000F, čo odpovedá príkazu „RUN“ – povolenie operácie.

Keď menič beží, môže mať viacero stavov ako napríklad „RUN“ (running), „ACC“ (acceleration), „DEC“ (deceleration) a podobne. Pri týchto stavoch je hodnota stavového registru

16#xx37 a motor je napájaný meničom. Motor môže byť zastavený zaslaním príkazu 16#0002, čo je rýchly stop alebo 16#0007. Po príkaze 16#0007 sa menič dostane naspäť do predchádzajúceho stavu „RDY, FST“. Po príkaze rýchly stop je stav meniča „FST, DCB“ (fast stop, DC injection), v stavovom registri 16#0017. Po zastavení motora je nutné poslať príkaz 16#0000, čím sa zablokuje napätie a menič sa dostane do svojho prvého stavu „NST“.

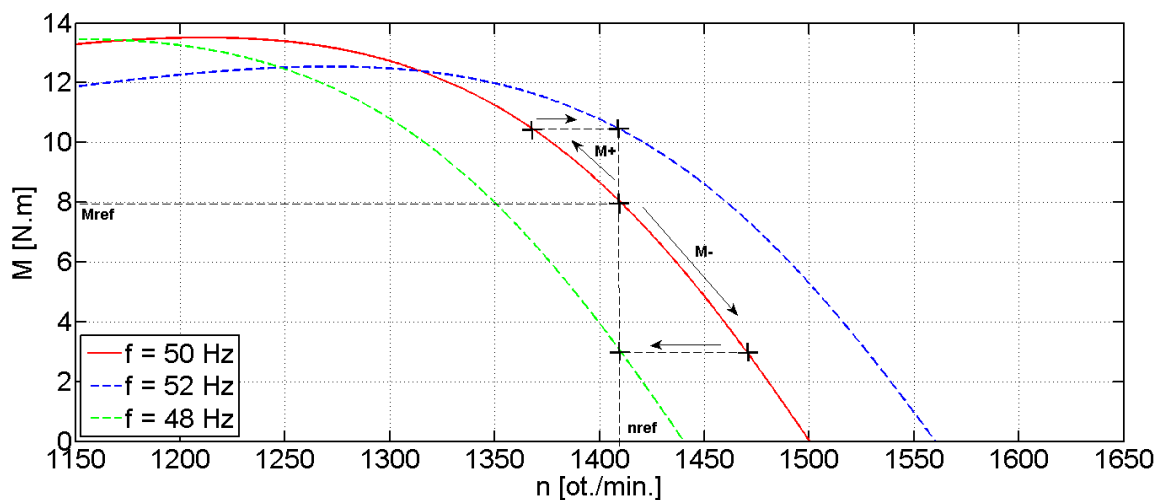


Obr. 17 Diagram možných stavov pri spúšťaní meniča [14]

7.3 Kompenzácia sklzu

Funkcia kompenzácie sklzu sa zavádza najmä kvôli dosiahnutiu konštantných otáčok motora pri meniacej sa záťaži. V prípade, že motor pracuje pri nominálnom momente s nominálnym sklzom a zvýši sa jeho záťaž, tak otáčky motora klesnú a tým sa jeho sklz zväčší. Naopak pri poklese záťaže sa jeho sklz zmenší. Oba tieto stavy spôsobujú variabilitu v rýchlosti, čo môže byť v rôznych aplikáciách nežiadúce.

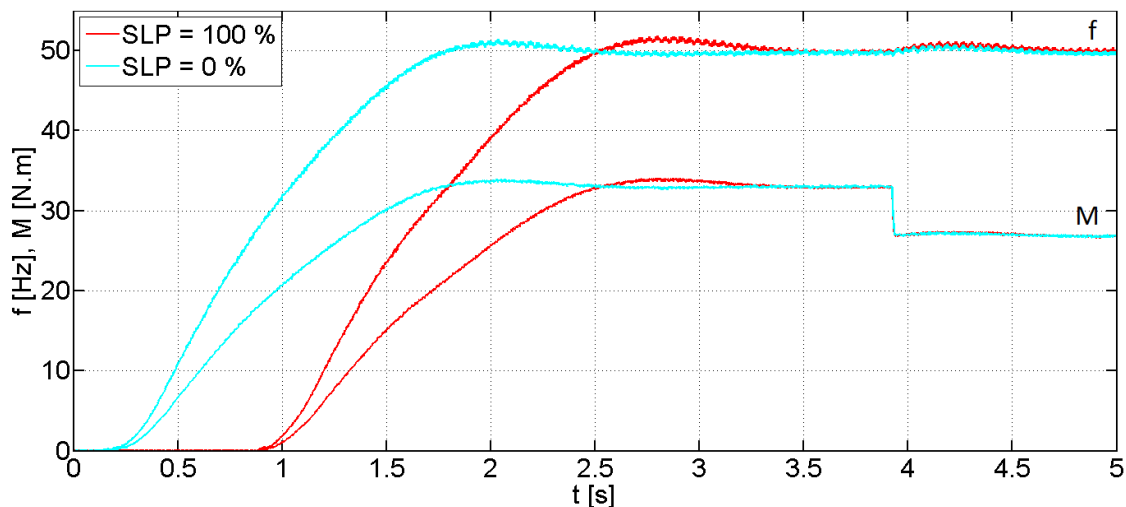
Cieľom kompenzácie sklzu je, aby motor pracoval pri nominálnych (referenčných) otáčkach. Pokiaľ sa aktuálna a referenčná rýchlosť nezhodujú a menič má nastavenú kompenzáciu sklzu na 100%, tak zmení parametre napätia motora, tak aby motor pracoval s nominálnym sklzom. Je možné zadať hodnoty kompenzácie sklzu až do 300%, ale neodporúča sa voliť hodnota vyššia ako 100%, pretože môže dochádzať k nestabilným stavom. Motor by zvyšoval svoju rýchlosť so zvyšujúcou sa záťažou, čo by napríklad pri ventilátorovej záťaži viedlo k nekonečnému rastu otáčok.



Obr. 18 Funkcia kompenzácie sklzu pri zmene záťaže a nastavení na 100%

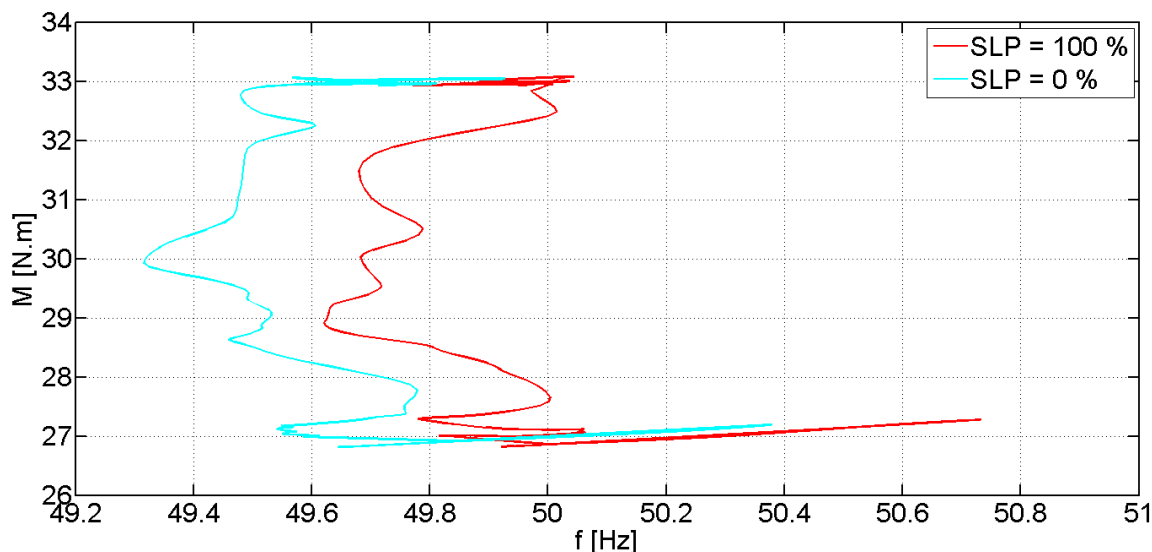
Kompenzáciu sklzu je možné si predstaviť ako posúvanie mechanickej charakteristiky doľava resp. doprava. Jej hodnota sa mení nastavením parametru Slip Compensation [SLP] a hodnota určuje percentuálny pomer $(\Delta n_{\text{pôvodná}} - \Delta n_{\text{nová}}) / \Delta n_{\text{pôvodná}}$.

Táto funkcia bola testovaná na asynchrónnom motore o výkone 5,5 kW.



Obr. 19 Časové priebehy veličín momentu a frekvencie asynchrónneho motora s výkonom 5,5 kW

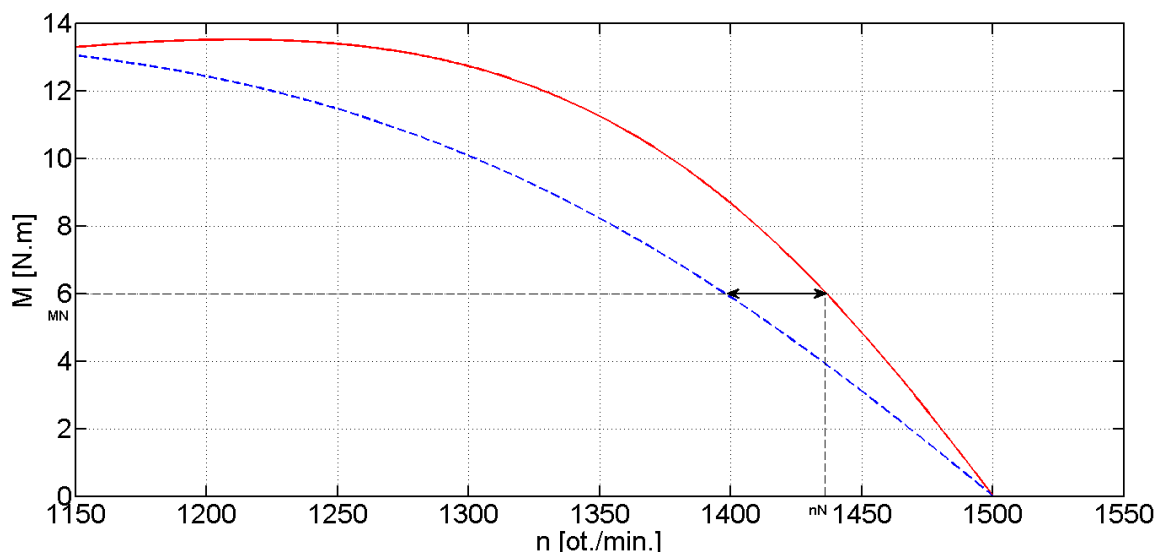
Pri oboch meraniach bola vyvolaná skoková zmena momentu z približne 33 N.m na 27 N.m. Grafy boli následne posunuté v čase, tak aby zmena nastala v ten istý okamih a dáta boli vyfiltrované v programe MATLAB. Z výsledkov je vidieť, že motor bez kompenzácie sklzu beží na trochu nižšej rýchlosti ako keď je $SLP = 100\%$. Z merania je zrejmé, že kompenzácia nemá žiaden vplyv na dynamický dej, ktorý pri zmene momentu nastane.



Obr. 20 Mechanická charakteristika motora pri skokovej zmene momentu

7.4 Korekcia záťaže (Load correction)

Load correction [LBC] je ďalší z parametrov meniča, ktorý umožňuje zmenu správania sa pohonu pomocou rôznych výstupných veličín meniča. Funkcia load correction je prístupná iba v prípade, že parameter zdieľania momentu (Load Sharing [LBA]) je nastavený na hodnotu 1. Korekciu záťaže je možné si predstaviť ako natáčanie stabilnej časti mechanickej charakteristiky motora.



Obr. 21 Funkcia korekcie záťaže meniča Altivar Process ATV 930

Parameter Load Correction sa udáva v Hz ako posun charakteristiky vo frekvencii pre nominálny moment. Tento parameter sa tak využíva vo viacmotorových sústavách pre vytvorenie podobnej mechanickej charakteristiky rozdielnych motorov.

S touto funkciou sú spojené ďalšie parametre, ktoré ovplyvňujú výslednú mechanicú charakteristiku. Parameter meniča LBC1 určuje minimálnu rýchlosť v Hz, pri ktorej je funkcia použitá. Zvyčajne sa zvýši trochu nad 0 Hz, pokiaľ sa pri nízkych rýchlostiach vyskytujú nestabilné stavy. LBC2 určuje maximálnu rýchlosť, pri ktorých sa zmeny majú aplikovať. Parameter LBC3 určuje minimálny moment, pri ktorom sa ešte má funkcia použiť. Tento parameter zabraňuje použitiu funkcie, ak by motor bol v generátorickom režime. Sharing Filter [LBF] určuje čas do dosiahnutia ustáleného stavu pre motory v prípade zmeny záťaže. Zvýšením hodnoty sa viac utlmujú oscilácie spôsobené flexibilnou väzbou systému.

7.5 IR kompenzácia

Parameter IR kompenzácia (IR compensation [uFr]) je kompenzácia úbytku napätia na kábloch alebo prívodoch do motora. IR kompenzácia je v podstate kompenzáciou neúčinnosti motora a je podobná kompenzácii sklzu s rozdielnym prístupom. V prípade nárastu momentu v rámci stabilnej časti mechanickej charakteristiky vzrastie aj prúd a tým sa zväčšia straty motora. Preto IR kompenzácia o trochu zvýši napätie. Tento parameter sa štandardne volí na 100%. Z hľadiska riadenia viacerých motorov by mala význam pokiaľ by bola u jedného pohonu zapnutá a u druhého vypnutá, čím by sa v rovnakých motoroch vytvoril momentový rozdiel. Takýto stav však nebol uvažovaný a kompenzácia bola nastavená rovnako pre oba motory.

Táto funkcia bola taktiež testovaná na asynchrónnom motore o výkone 5,5 kW. Toto meranie však iba potvrdilo, že IR kompenzácia podobne ako kompenzácia sklzu ovplyvňuje iba ustálené stavy. Bez nej je napätie motora o trochu nižšie a teda aj motor beží na trochu nižších otáčkach ako s plnou kompenzáciou. Iba kombináciou plnej IR kompenzácie a kompenzácie sklzu motor dosahuje pri zaťažení svoju referenčnú hodnotu (otáčok alebo frekvencie). Bez použitia jednej z funkcií motor beží na nižších otáčkach.

7.6 Master-Slave nastavenie

Pre spoluprácu motorov typu Master-Slave je potrebné zmeniť nastavenia v príslušných meničoch. Aktivovanie módu Master-Slave sa deje prostredníctvom parametra M/S Communication Mode [MSCM], ktorý je potrebné nastaviť na hodnotu 1. Hodnota 1 znamená M/S komunikáciu meničov používaním tzv. MultiDrive Linku, ktorý v tomto prípade predstavoval Ethernet. Inou možnosťou je nastavenie do hodnoty 2, ktorá znamená použitie analógových vstupov a výstupov. V prípade aktuálneho nevyužívania Master-Slave módu, musí byť MSCM = 0.

Ďalej je potrebné nastaviť parameter selekcie ID zariadenia. Zariadenie v tomto systéme môže byť Master alebo Slave v poradí od 1 do 10. Skratka tohto parametra je MSID (Master or Slave ID selection) a nadobúda hodnoty od 1 do 11. Hodnota 1 pre daný menič odpovedá ID Master, hodnoty od 2 do 11 odpovedajú ID Slave 1 až 10 v analogickom poradí. Okrem toho meniče potrebujú informáciu o počte Slavov, ktorá sa zadáva do parametra MSSN (M/S Number of Slaves). Pre bezchybné fungovanie je vhodné taktiež zvýšiť hodnotu komunikačného timeoutu, ktorého nízka hodnota by mohla viesť menič do chyby. Táto hodnota sa zadáva do parametra MLTO (MultiDrive Link Communication Timeout) a môže byť v rozmedzí 0,01s až 10s.

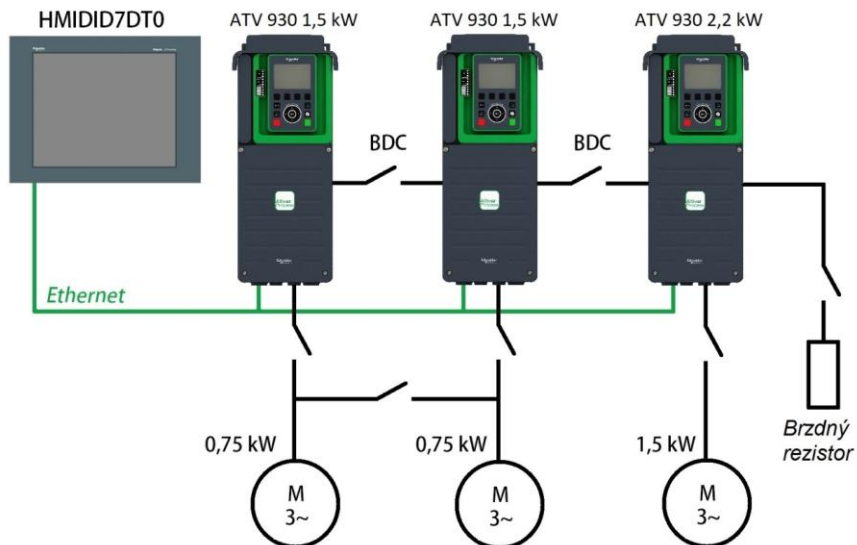
Pri spolupráci motorov Master-Slave je dôležité poradie spúšťania motorov. Slave menič musí ako prvý zmeniť svoj stav na „RUN“, až potom sa môže zapnúť Master menič.

8 Zdieľanie momentu v sústave

Pri veľkých záťažiach je často výhodné využívať viacero motorov zdieľajúcich moment, ako jeden motor o väčšom výkone, zvyčajne kvôli rozmerovým dôvodom. Pri takejto spolupráci motorov je dôležité, aby motory boli rovnako percentuálne využité. Aj pri zdanlivo identických motoroch podľa štítku sú motory často rozdielne, kvôli rozdielom v magnetickým obvodoch, dĺžke prívodov a podobne, ktoré spôsobujú nerovnomerné rozdelenie výkonu medzi motory. Rozdelenie môže byť natoľko nerovnomerné, že jeden z motorov brzdí ten druhý, čím časom dôjde k tepelnému preťaženiu stroja a prípadným havarijným stavom. Rozdelenie momentov by mala určovať a regulovať logika frekvenčných meničov.

8.1 Popis systému

V programe Citect Studio bol vytvorený program na komunikáciu a vizualizácia, ktorá bola nahraná na operátorský panel. Čítanie a zápis parametrov do jednotlivých meničov prebiehal po Ethernete pomocou protokolu Modbus TCP. Každému meniču prislúchal jeden asynchrónny motor, z ktorých jeden simuloval záťaž a dva túto záťaž pokrývali. Motory, ktoré si rozdeľovali záťaž mohli byť napájané z jedného alebo dvoch meničov. Menič tretieho motora mal pripojený brzdný rezistor pre marenie energie pri brzdení. Okrem toho bolo možné spojenie všetkých DC medziobvodov, čiže energia brzdením sa nemusela mariť len v rezistore, ale mohla sa rekuperovať v prvých dvoch meničoch.



Obr. 22 Schéma zapojenia prvkov vo viacmotorovej sústave a jej riadiacej sústave [11][15]

Vo viacmotorovej sústave boli použité tieto motory:

Tab. 3 Parametre motora simulujúceho záťaž

Označenie	SIEMENS 1LA7 096-4AA10-Z
Výkon	1,5 kW
Nominálne otáčky	1420 min. ⁻¹
Účinník cos φ	0,81
Účinnosť	0,79
Nominálny prúd	3,4 A
Záberný prúd	18,02 A
Nominálny moment	10,1 N.m
Moment zvratu	26,26 N.m

Tento motor slúži vo viacmotorovej sústave na simuláciu záťaže pre motory. Túto záťaž pokrývali dva rovnaké motory:

Tab. 4 Parametre motorov pokrývajúcich záťaž

Označenie:	SIEMENS 1LA7 083-4AA10-Z
Výkon	0,75 kW
Nominálne otáčky	1395 min. ⁻¹
Účinník cos φ	0,8
Účinnosť	0,72
Nominálny prúd	3,27 A
Záberný prúd	13,73 A
Nominálny moment	5,1 N.m
Moment zvratu	11,73 N.m

Meniče Altivar Process ATV930 ponúkajú tri možnosti pre zdieľanie momentu:

- Bez regulácie - prirodzené rozdelenie momentov
- Regulácia vyrovnaním záťaže
- Regulácia na princípe Master-Slave

Pre všetky metódy zdieľania záťaže boli simulované nasledujúce typy záťaže:

- konštantná záťaž
- ventilátorová záťaž
- skoková záťaž

Motor, ktorý bol označený ATV930_3 simuloval jednotlivé typy záťaže nasledujúcim spôsobom. Jeho referenčná hodnota frekvencie bola stanovená na o niečo menšiu hodnotu ako ostatným dvom meničom. Prvým dvom motorom boli nastavené určité rozbehové rampy, pričom tretiemu bola nastavená pomalšia rampa. Pri štarte je totiž referenčná frekvencia funkciou tejto rampy.

Pri každom meraní, istú krátku chvíľu po štarte motorov majú všetky tri motory kladný moment. Až po chvíli je u tretieho meniča rozdiel referenčnej frekvencie generovanej rampou a aktuálnej frekvencie dostatočne veľký. Táto regulačná odchýlka vstupuje do regulátora, menič obracia polaritu momentu a motor začína brzdiť. Podľa jednotlivých typov záťaže boli menené rampy, tak aby charakteristiky, čo najviac odpovedali realite. Samotný simulovaný priebeh bol vytváraný obmedzením maximálneho momentu motora ATV930_3 v generátorickom režime. Toto obmedzenie bolo generované z vizualizácie vytvorenej v programe Citect Studio.

8.2 Prirodzené rozdelenie momentov (bez regulácie)

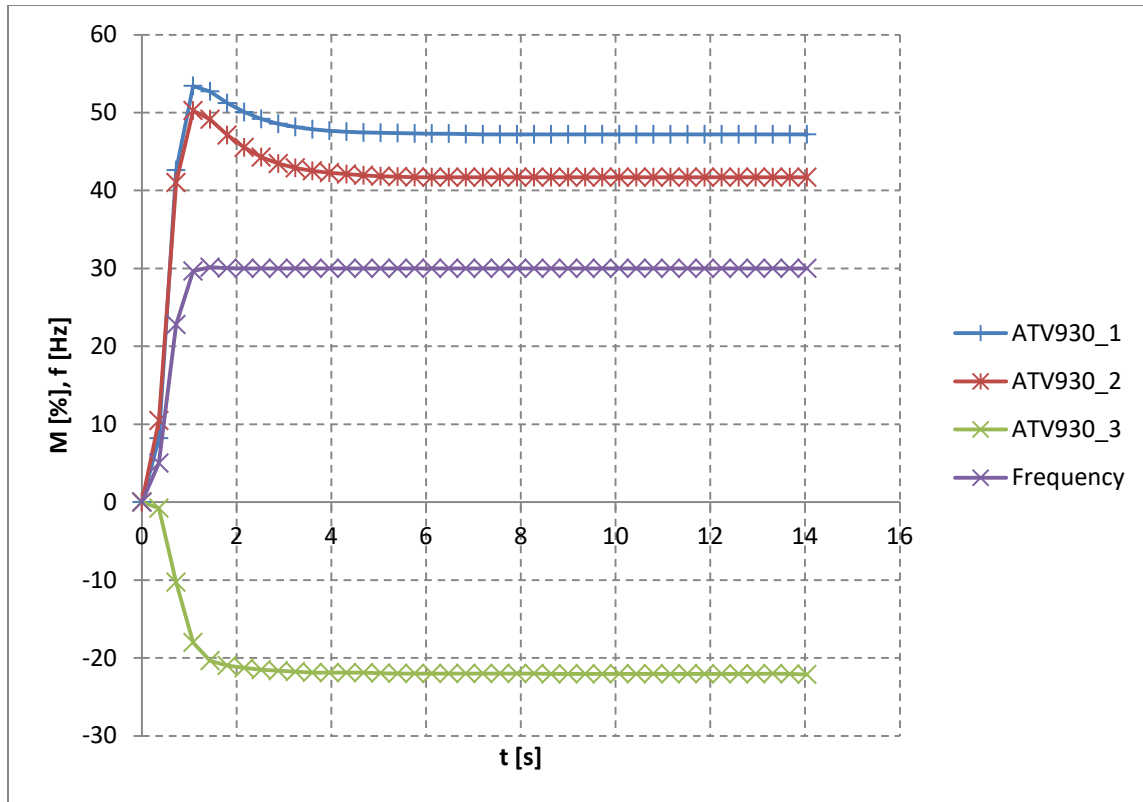
V prípade prirodzeného delenia momentov sú motory napájané zo spoločného meniča, ktorý musí byť nadimenzovaný, tak aby bol schopný dodávať kombinovaný prúd motorov. Ak by boli použité dva meniče, z praktického hľadiska nemá význam využívať prirodzené rozdelenie momentov, keďže dva meniče poskytujú širšie možnosti regulácie a optimalizácie rozdelenia momentu.

Motory si bez regulácie prirodzene delia záťaž, čo môže efektívne fungovať len v prípade identických motorov. Menič neposkytuje funkciu kompenzácie sklzu, pretože nedokáže regulovať dva motory naraz. Nevýhodami tohto riešenia sú zhoršujúce sa rozdelenie momentu medzi rozdielne motory pri vyššom zaťažení, neschopnosť udržiavať rýchlosť motorov konštantnú pri meniacej sa záťaži, neregulovateľnosť a potenciálna nestabilita procesu.

Výhodou tohto riešenia sú predovšetkým nízke náklady a jednoduchosť. Tento spôsob zdieľania záťaže je často postačujúci pre rôzne nenáročné aplikácie. Táto metóda sa často využíva aj pri viac ako 2 pohonoch a najmä pri flexibilnej väzbe motorov, napríklad cez remene alebo dopravné pásy.

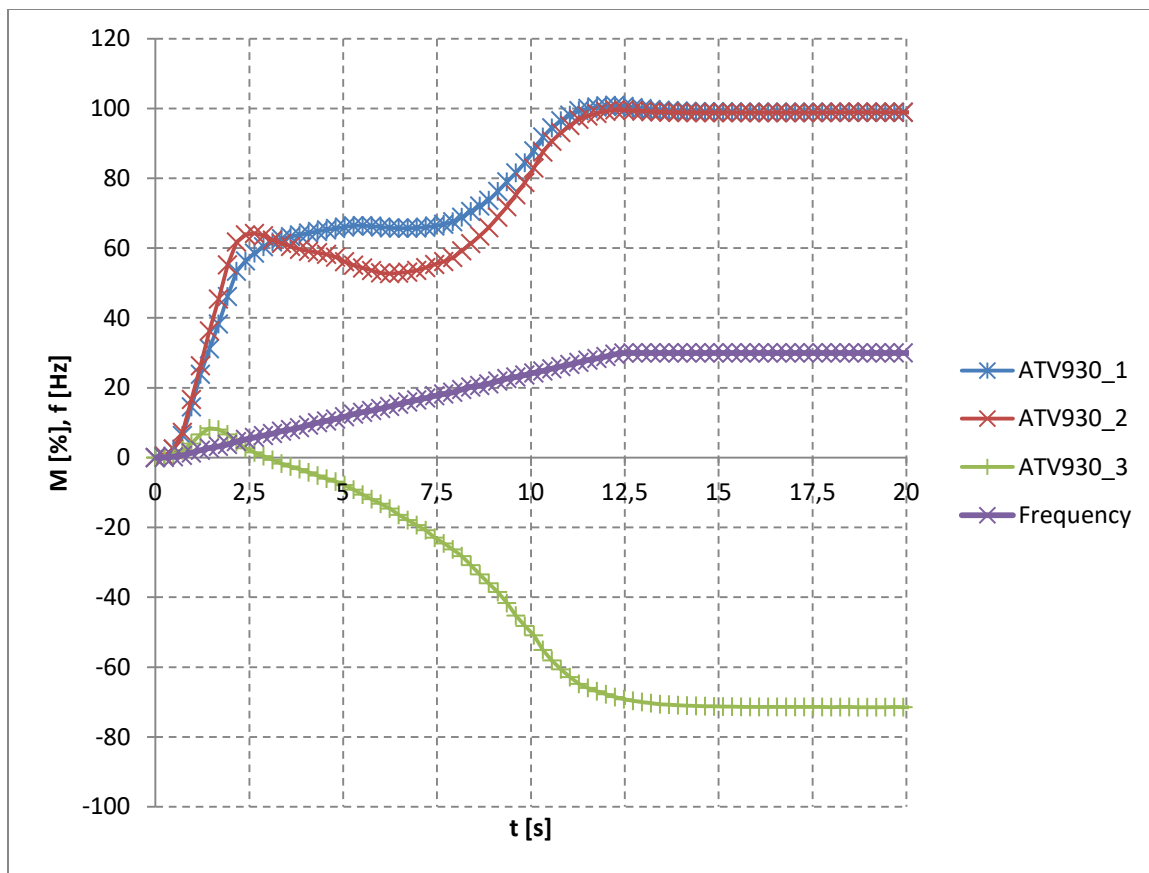
Pri testovaní tejto metódy zdieľania momentu nebolo možné z jedného meniča získať informácie o momentoch jednotlivých motorov, iba o celkovom momente a preto boli použité samostatné meniče pre oba motory. Tým bola nastavená rovnaká referenčná frekvencia, rovnaké štartovacie rampy a štartovací povel dostali podľa možnosti v ten istý moment.

Na začiatok bol nameraný priebeh rozdelenia záťaže pri konštantom zaťažení pre analýzu počiatočného stavu a rozdieloch v mechanických charakteristikách daných konštrukciou motorov. Pri všetkých meraniach bola stanovená referenčná frekvencia pohonov v motorickom režime 30 Hz.



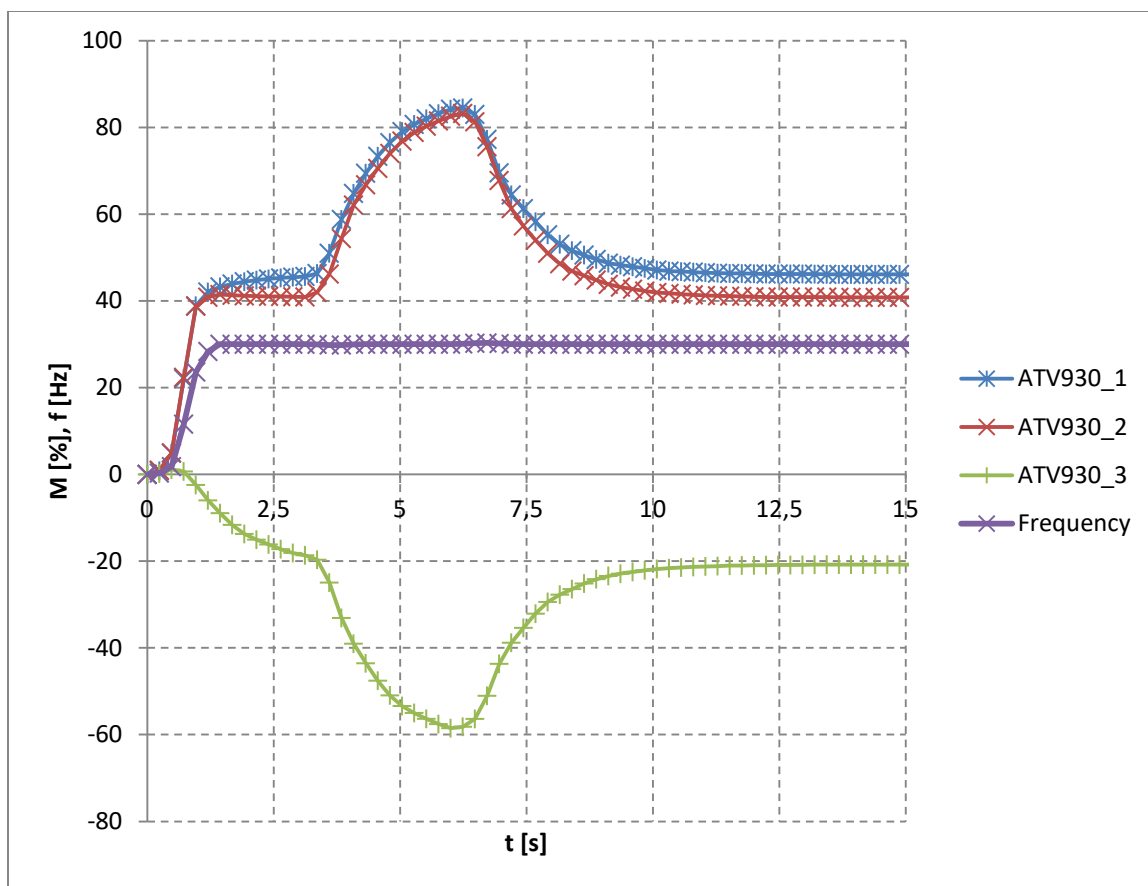
Obr. 23 Priebehy momentov motorov a frekvencie systému bez regulácie systému pri konštantnej záťaži

Pri tomto meraní boli všetkým trom motorom nastavené rýchle rampy (do jednej sekundy). Počas rámp mali motory ATV930_1 a ATV930_2 strmý nárast momentu kvôli urýchľovaniu zotrvačných hmôt a pokrývaniu záťaže od motoru ATV930_3. Po dosiahnutí referenčných otáčok prvé dva motory pokrývali len záťaž od tretieho motoru a mechanické straty systému. Z časových priebehov je vidieť, že motory si v ustálenom stave rozdelili moment nerovnomerne, konkrétne o 5,5%.



Obr. 24 Priebeh momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie pri ventilátorovej záťaži

Pri simulovaní ventilátorovej záťaže boli nastavené pomalé rampy všetkých meničov a limitácia momentu motora ATV930_3 stúpala kvadraticky. Zo začiatku motor ATV930_3 spolupracoval s prvými dvoma motormi, ale približne v čase $t = 2,5s$ začal brzdiť a správne simulovať požadovaný priebeh. Motory sa v tomto momente výraznejšie momentovo diferencovali, no po ukončení prechodného deja sa ustálili na takmer rovnakej hodnote. Maximálny rozdiel v momente počas dynamického deja bol 13,1%, v ustálenom stave iba 0,3%.



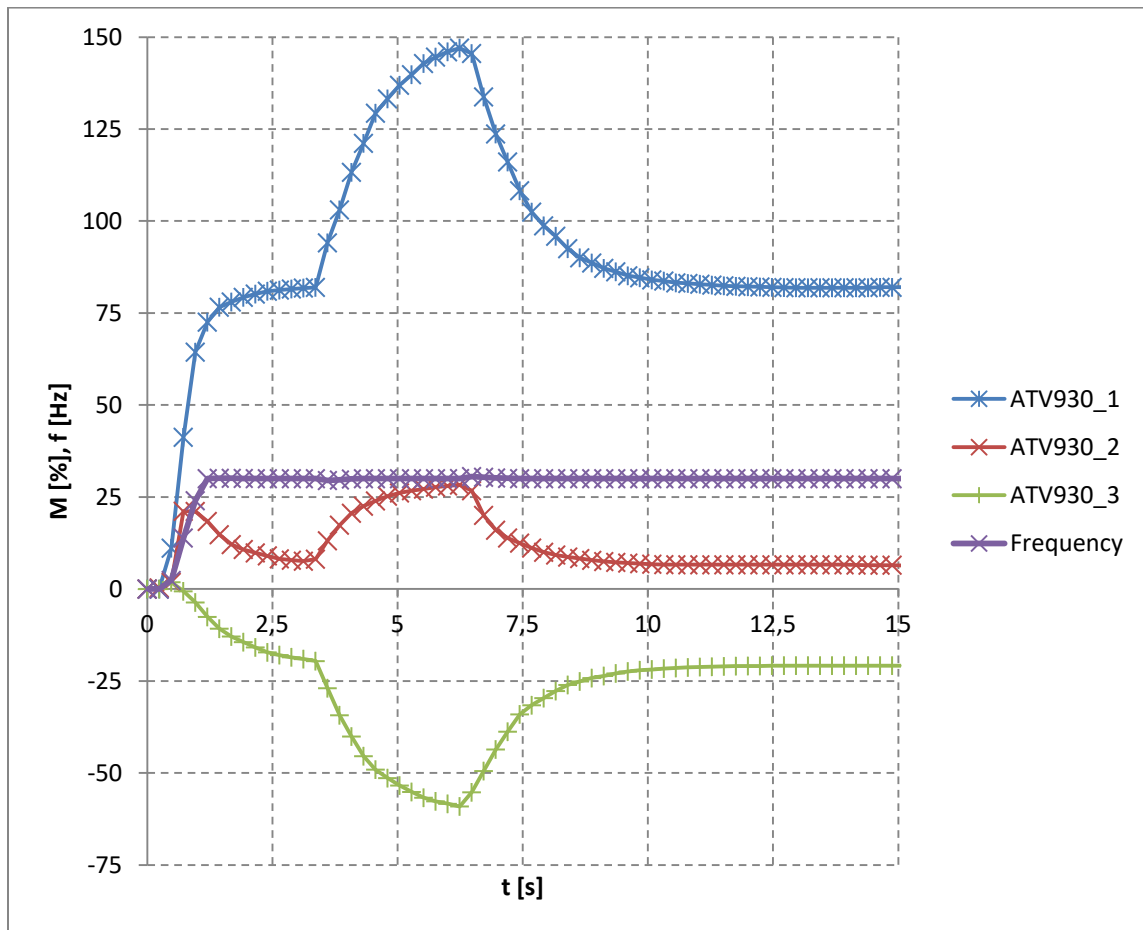
Obr. 25 Priebehy momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie a simulovanej pulznej záťaži

Pri simulovaní pulznej záťaže sa mal generátorický limit momentu motora ATV930_3 zväčšiť skokovo z 20% na 80% a po čase 2,5 sekundy späť na 20%. Strmosť nárastu sa dala meniť pomocou konštánt regulátora momentu motora, lenže nepodarilo sa dosiahnuť vyšší nárast ako na Obr. 25. Pri tomto priebehu je najväčší momentový rozdiel iba 5,3%, ktorý nastal pri ustálenom stave.

Z priebehu pri simulovaní ventilátorovej záťaže by sa dalo očakávať, že sa motory rozchádzajú v pokrývaní záťaže kvôli dynamickým zmenám, avšak pri pulznej záťaži bola rovnomernosť rozdelenia vyššia práve pri zmenách momentu. Kvôli tomu bolo zhodnotené, že rozdelenie momentov pre motory ATV930_1 a ATV930_2 je tým nerovnomernejšie, čím je menšie zaťaženie. Táto nerovnomernosť bola pravdepodobne spôsobená rozdielmi v konštrukciách strojov, ktoré mohli vzniknúť pri výrobe motorov. Dynamické zmeny momentu pridali/odobrali tomuto rozdielu približne 8%.

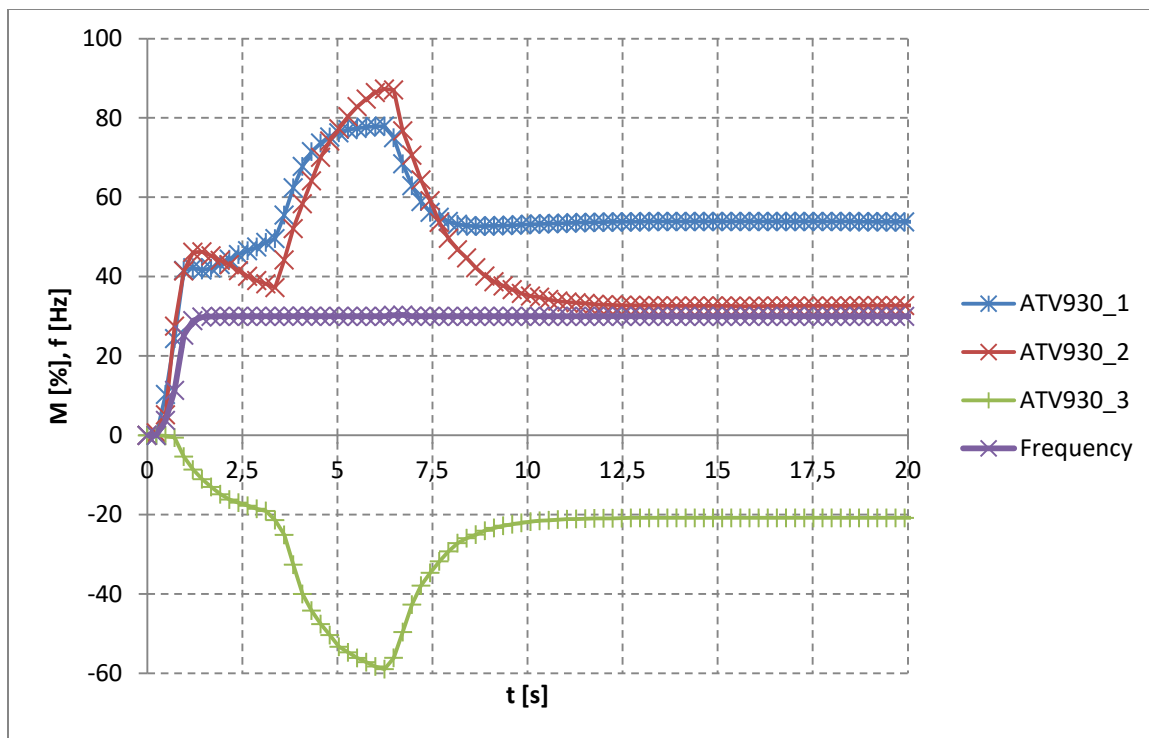
Kompenzácia sklzu motorov v prípade použitia dvoch meničov by mala byť v tomto prípade vypnutá. Pri jej povolení by akákoľvek regulačná odchýlka v rýchlosti postupne spôsobila nežiadúci stav v rozdelení momentu.

Ak ju má jeden z motorov zapnutý a druhý vypnutý, pri prípadnom poklese momentu na druhom motore sa motoru s kompenzáciou sklzu moment zvýši a menič mu posunie charakteristiku na vyššiu frekvenciu. Tým odľahčí druhý motor a dej sa teoreticky môže znova opakovať. Tento jav môže vzniknúť aj bez zmeny záťaže, pretože veličiny meniča obsahujú šumy. Pri testoch použitia kompenzácie sklzu sa často momentový rozdiel dostal na vysoké hodnoty a motory často pracovali proti sebe. Takýto stav smeroval k tepelnému preťaženiu motorov a zastaveniu meničmi. Preto boli otestované aj tieto možnosti pre pulznú záťaž.



Obr. 26 Priebiehy momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie s použitím kompenzácie sklzu SLP = 100% na motor ATV930_1 a pulznej záťaži

Z priebehov momentov motorov je vidieť, že motor s kompenzáciou sklzu pokrýval väčšinu záťaže a bol krátkodobo preťažený. Rozdelenie momentov tak nefungovalo ani zďaleka podľa požiadaviek.



Obr. 27 Priebehy momentov motorov a ich frekvencie bez regulácie s použitím kompenzácie sklzu SLP = 100% na oba motory ATV930_1 a ATV930_2 a pulznej záťaži

Pri použití kompenzácie sklzu na oba motory rozdelenie momentov opäť nespĺňa požiadavky a takmer identické motory majú v ustálenom stave rozdiel približne 21% nominálneho momentu. Časové priebehy sa v tomto prípade pomerne ťažko analyzujú, pretože dve na sebe nezávislé regulačné slučky majú rovnakú úlohu a to udržať frekvenciu 30 Hz a tým pádom správanie motorov môže závisieť od minimálnych zmien v sústave. Na detailnejšiu analýzu by bola potrebná celá regulačná štruktúra, ktorá nie je k dispozícii a je samotným know-how meničov Schneider Electric.

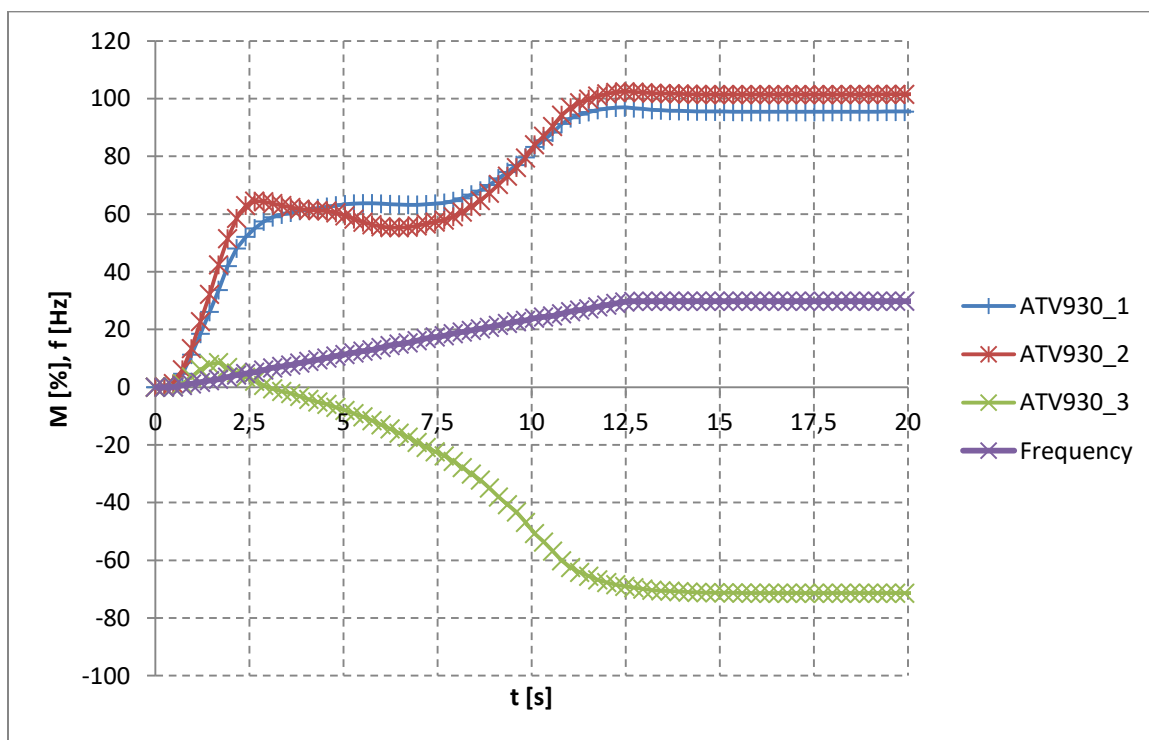
Keďže uzavretá slučka vektorového riadenia FVC využíva plnú kompenzáciu sklzu, pri všetkých meraniach sa využívalo bezsnímačové vektorové riadenie SVC.

8.3 Load balancing - vyrovnávanie záťaže

Vyrovnávanie záťaže je druhou z možností zdieľania momentu motorov, ktorá bola využívaná. Rozdiel tejto metódy oproti žiadnej regulácii je v použití parametra korekcie záťaže na jeden z motorov. Pri tejto metóde majú oba motory nastavené rovnaké hodnoty referenčných otáčok, rozbehové rampy, spoločný štartovací povel a vypnutú kompenzáciu sklzu.

Výhodou tohto riešenia je regulovateľnosť výkonu individuálneho motoru. Na druhej strane však neexistuje žiadna automatická kompenzácia medzi oboma motormi, čo by mohlo viesť k nevyhovujúcim stavom.

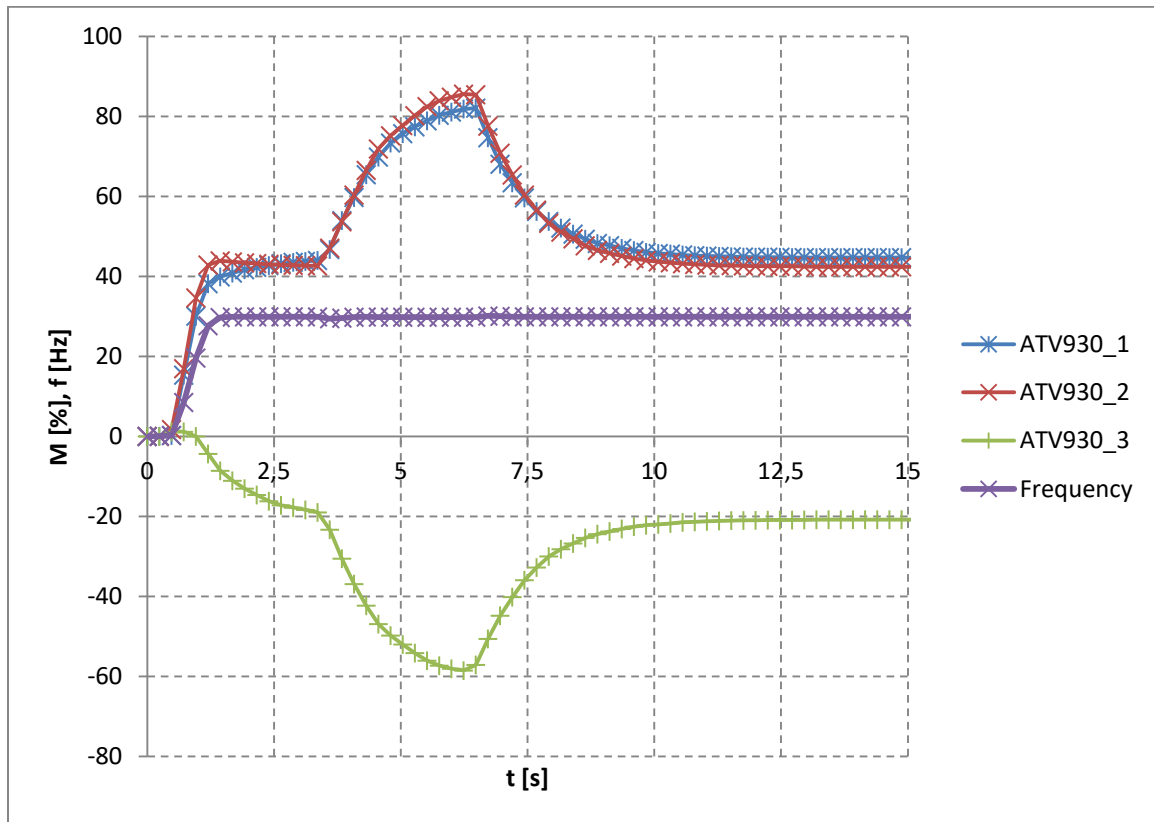
Funkcia korekcie záťaže by mala byť použitá na motor so strmějšíou stabilnou časťou mechanickej charakteristiky, tak aby bola čo najbližšie charakteristike druhého motora. Tým sa docieli rovnaké rozloženie momentu pri nominálnom momente a zoptimalizuje sa pri rôznych typoch záťaží. Na základe výsledkov meraní bez regulácie, bol zvolený parameter $LBC = 0,2\text{Hz}$ pre motor ATV930_1.



Obr. 28 Priebehy momentov motorov a ich frekvencie pri metóde load balancing s $LBC = 0,2\text{ Hz}$ pre motor ATV930_1 pri ventilátorovej záťaži

Z priebehov na Obr. 28 je vidieť, že zaťaženie motora ATV930_1 pokleslo vplyvom korekčného parametra LBC. Keďže v prvom prípade bola pri ustálenom stave odchýlka takmer

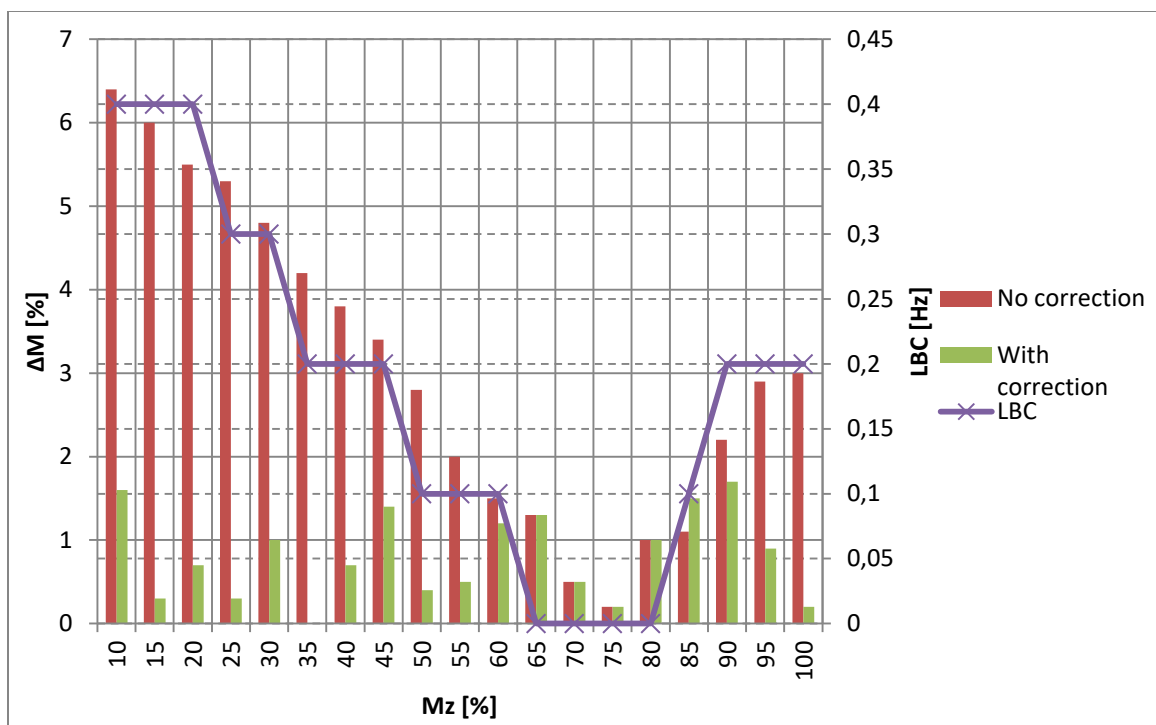
nulová a teraz bola približne 6%, takáto regulácia nie je z dlhodobého hľadiska ideálna. Výhodou tejto korekcie však je, že sa znížil momentový rozdiel počas prechodného deja z 13,1% na 10,8%.



Obr. 29 Priebehy momentov motorov a ich frekvencie pri metóde load balancing s LBC = 0,2 Hz pre motor ATV930_1 pri pulznej záťaži

Výsledky metódy vyrovnávania záťaže pri simulovaní pulznej záťaže boli podľa očakávaní. Bez regulácie totiž motor ATV930_1 počas celého deja pokrýval väčšiu časť záťaže. S korekciou sa momentový rozdiel v ustálenom stave znížil na 2,3% z 5,3%. Najväčší rozdiel nastal pri vrchole krivky momentu rovný 4,6%.

Na základe výsledkov meraní spomenutých v 8.2 bol navrhnutý korekčný činiteľ LBC pre rôzne veľkosti záťaže. Jeho hodnoty boli získané experimentálne za cieľom dosiahnuť, čo najnižší momentový rozdiel v ustálenom stave.



Obr. 30 Výsledky rozdielu v momente pre rôzne zaťaženia systému a tomu prispôsobený parameter LBC

Z výsledkov je vidieť, že s použitím korekcie záťaže sa momentový rozdiel znížil a nenadobúda tak vyššiu hodnotu než 1,7%. Do 60% momentu brzdiaceho motora bola korekcia priradzovaná motoru ATV930_1, medzi 65% a 80% nebola použitá žiadna korekcia a od 85% vyššie sa uplatnila korekcia na motor ATV930_2.

Je potrebné si však uvedomiť, že tieto výsledky platia iba pre ustálený stav a nezaručujú stabilitu celého systému v prípade rôznych výnimočných stavov. Takými môže byť napríklad tepelné preťaženie motorov a zmeny ich mechanických charakteristík. Za takýchto okolností by bol potrebný nadradený riadiaci systém, ktorý by vypočítaval aktuálne najlepšiu možnú hodnotu parametra LBC.

Z výsledkov je taktiež vidieť, že pri meraní pri 85% záťažného momentu bol s korekciou dosiahnutý o trochu vyšší momentový rozdiel než bez regulácie. Dôvodom mohli byť zmeny tepelných stavov motorov, keďže merania sa vykonávali v krátkom časovom slede. V čase nastavovania parametra LBC pre moment 85% bola odchýlka bez korekcie už vyššia než pri prvom meraní a tak odchýlka 1,4% bola v konečnom dôsledku znovu znížením rozdielu. Tieto výsledky taktiež určite ovplyvnila nepresnosť výpočtov momentov meničmi, keďže sa jedná o veľmi malé rozdiely.

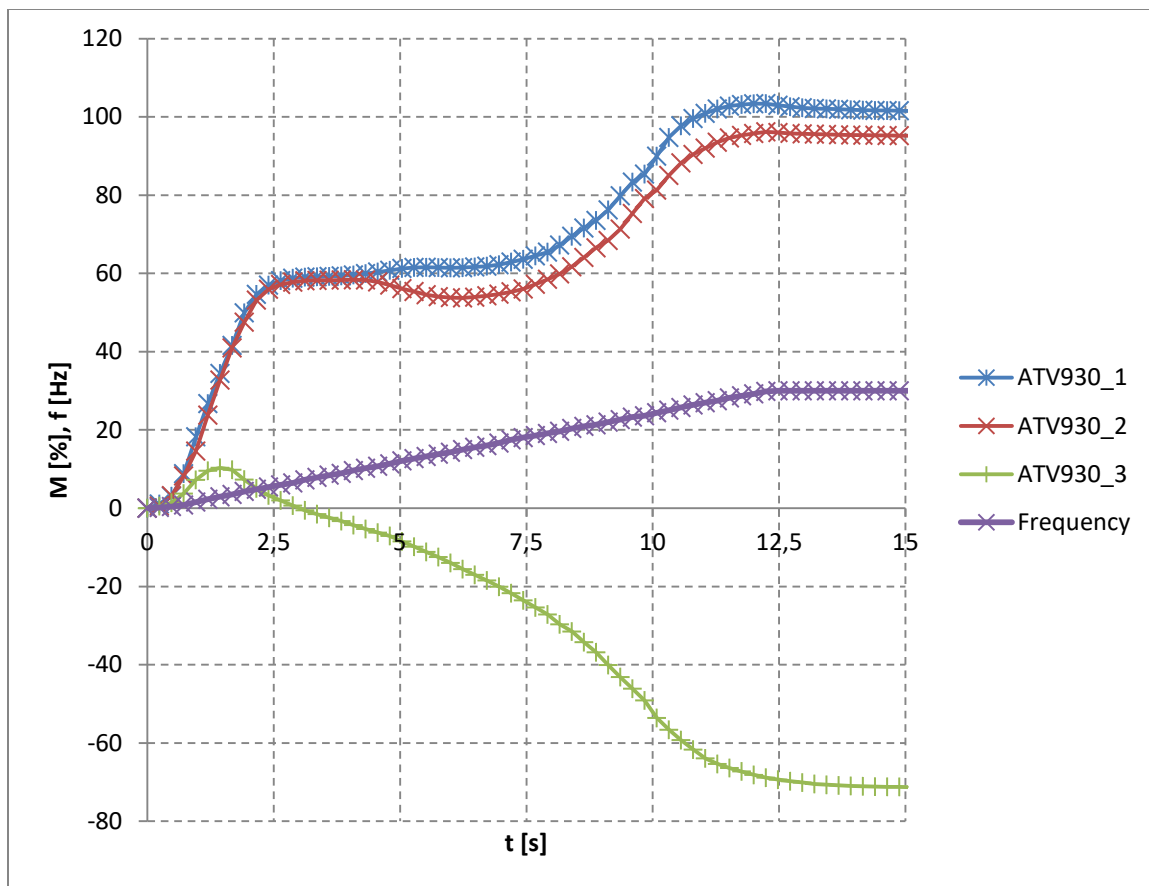
8.4 Master - Slave

Princíp Master - Slave je vhodný pre prípady zdieľania momentu, kde je požadovaný vyšší výkon a vyžaduje sa vyššia presnosť. Táto metóda sa používa vždy pre pevné spojenia motorov, keď sú napríklad oba pohony na jednom hriadeli a regulácia musí fungovať spoľahlivo.

Master a Slave menič majú spoločnú referenčnú hodnotu otáčok alebo frekvencie. Master menič sa rozbieha ako prvý a odosiela svoju aktuálnu hodnotu momentu cez MultiDrive Link (komunikačné spojenie viacerých pohonov) meniču Slave. MultiDrive Link bol v tomto prípade realizovaný Ethernetom, ale môže ním byť aj spojenie analógového výstupu meniča Master a analógového vstupu meniča Slave. Výhodou spojenia cez Ethernet je, že dáta sa odosielajú obojsmerne a teda, ak by Slave menič prešiel do chyby, Master sa o tom dozvie.

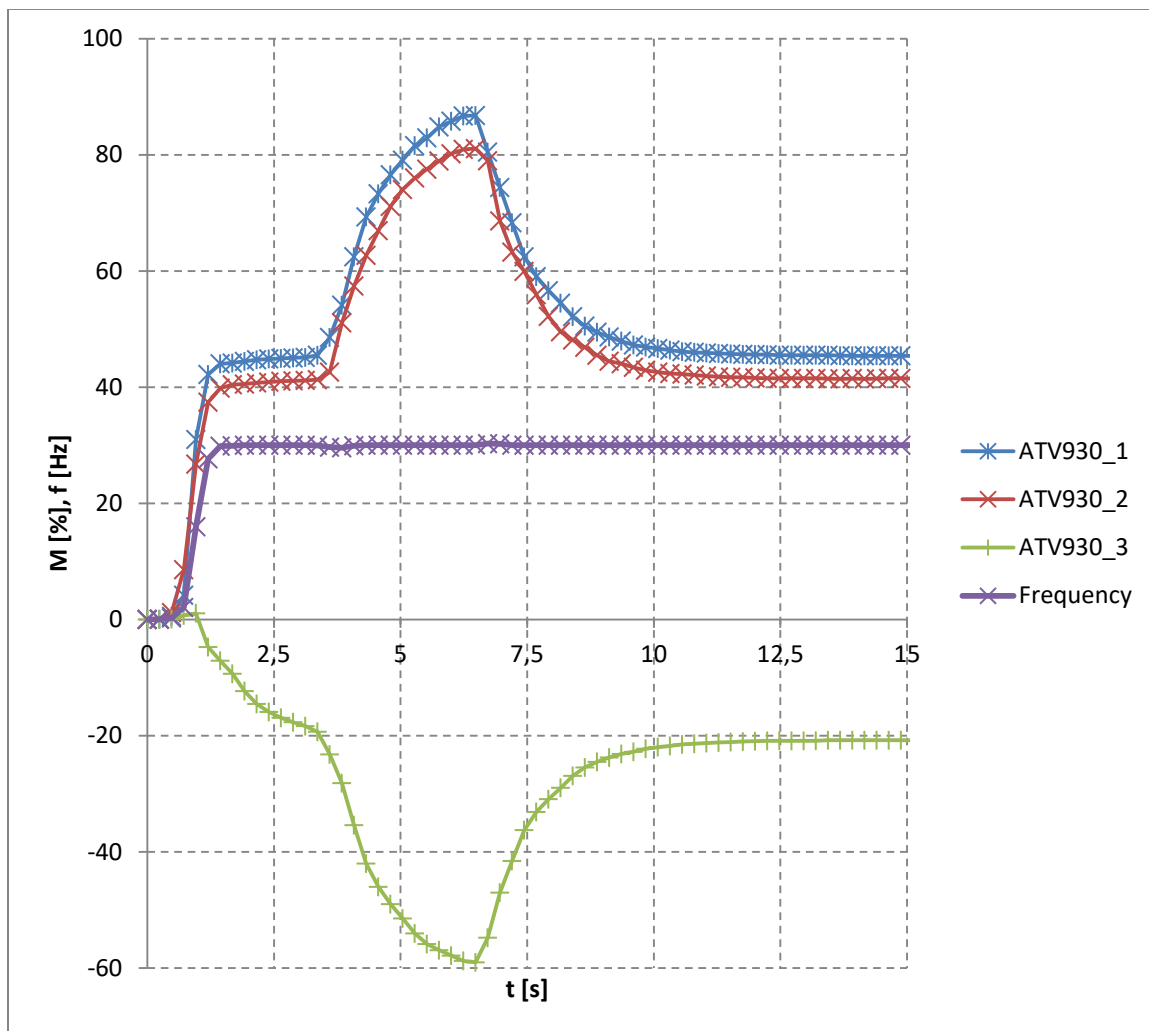
Master odosiela svoj moment v percentuálnom tvare. Slave menič je buď v móde regulácie momentu alebo otáčok. Ak je odchýlka v rýchlosti v určitom rozsahu (deadband), Slave je v móde regulácie momentu a jeho referencia je moment od Mastera. Keďže moment je odosielaný v percentuálnom tvare, v prípade rozdielnych motorov sa bude percentuálne využitie motorov blížiť k sebe. Ak je odchýlka referenčných a aktuálnych otáčok vyššia, Slave sa prepne do módu regulácie otáčok a po dosiahnutí hodnoty v rámci rozsahu sa prepne späť do módu regulácie momentu.

Masterom pri meraniach bol motor ATV930_1 a Slaveom motor ATV930_2. Pri testovaní metódy Master-Slave bol opäť použitý spôsob riadenia SVC pre oba motory, pretože FVC spôsoboval príliš dynamické zmeny v momente a odchýlky v momentoch sa zväčšovali. Motory s FVC tak často pracovali proti sebe.



Obr. 31 Priebehy momentov motorov a frekvencie pri Master-Slave režime a kvadratickej zát'aži

Z priebehov je možné vidieť, že od momentu, kedy začal motor ATV930_3 brzdiť, sa zaťaženie jednotlivých motorov začalo líšiť. Pri ďalšej zmene momentu a jeho ustálení na konštantnej hodnote sa tento rozdiel udržoval na hodnote 6,3%.



Obr. 32 Priebehy momentov motorov a ich frekvencie pri Master/Slave princípe a pulznej záťaži

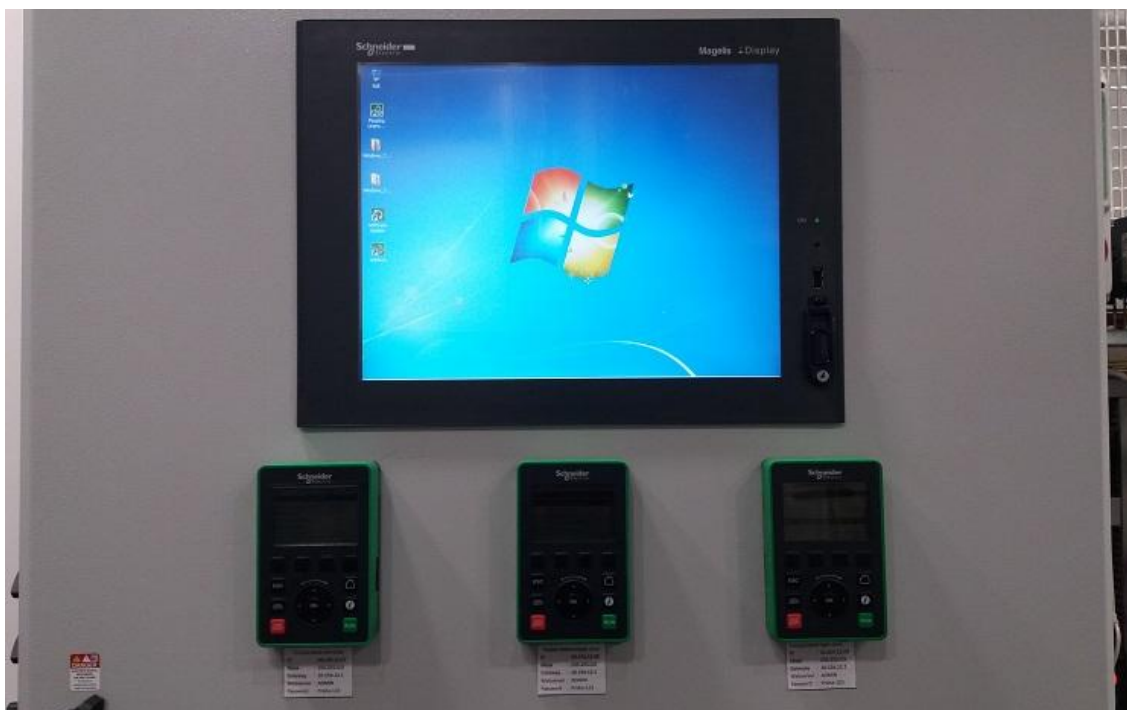
Výsledky pri pulznej záťaži sú dosť podobné výsledkom pri ventilátorovej záťaži. Slave menič udžuje moment svojho motora v blízkom rozsahu k momentu Master motora. Maximálny rozdiel momentov bol 6,6%, v ustálenom stave 4%.

Dosiahnutý momentový rozdiel nie je tak nízky ako bez regulácie, kedy sa záťaž rozdelila takmer presne na polovicu, alebo ako pri korekcii záťaže, kde bol dosiahnutý rozdiel maximálne 1,7% v ustálenom stave. Výhoda tejto metódy však spočíva v tom, že tento momentový rozdiel sa zachová pri rôznych frekvenciách a záťažných momentoch, pretože meniče spolu neustále komunikujú. Master-Slave systém tak oproti ostatným metódam zaručuje stabilitu viacmotorového systému.

9 Vizualizácia systému

Meniče pohonov vo viacmotorovej sústave neboli riadené z PLC ako to zvyčajne býva v praxi, ale priamo z operátorského panelu. Tento panel tak predstavoval nadradený systém, ktorý musel spĺňať podmienky pre konfigurovanie meniča a zároveň všetky požiadavky kladené na HMI systémy. Medzi ne patrí zobrazovanie trendov, aktuálnych hodnôt, riadenie pohonov a ďalšie špecifické požiadavky ako prepínanie medzi jednotlivými metódami zdieľania momentu alebo generovanie rôznych priebehov záťažného momentu. Vytvorenie týchto obrazoviek spočívalo v nakreslení obrazoviek v Citect Editore a prípadné programovanie v Cicode Editore.

Vizualizácia bežala na dotykovom paneli HMIDID7DT0 a operačnom systéme Windows 7 32 bit. S ohľadom na pamäť RAM použitého priemyselného počítača, ktorá bola rovná len 1 GB, bolo nutné zoptimalizovať program, tak aby dokázal bežať plynule.



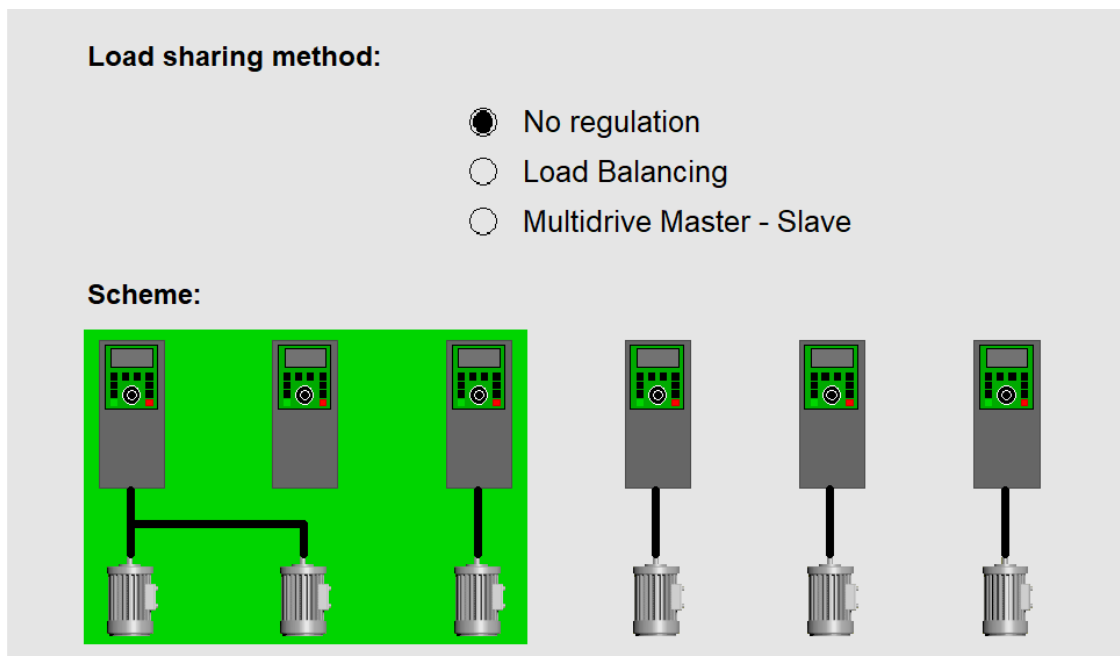
Obr. 33 Umiestnenie operátorského panelu do pôvodnej rozvodnej skrine viacmotorovej sústavy

9.1 Výber metódy zdieľania momentu

Obrazovka pre výber metódy zdieľania momentu má hlavne informatívny charakter. Používateľ na nej vyberá jednu z troch možností: No regulation, Load balancing alebo Master-Slave. Pri metóde „bez regulácie“ mali byť oba motory napájané prvým meničom, preto sa pri zmene z ostatných dvoch možností na túto metódu zobrazí vyskakovacie okno, ktoré upozorní na potrebu zmeniť zapojenie motorov. Rovnako tak to platí, ak dôjde k zmene metódy naopak, teda z možnosti „bez regulácie“ do jednej zo zvyšných metód. Okrem výberu jednej z možností sú znázornené jednotlivé elektrické zapojenia a zvýraznené to zapojenie, ktoré je aktuálne vzhľadom na používanú metódu.

Zmenou metódy sa v rámci meničov menia iba najdôležitejšie parametre: Load Sharing (LBA), Load Correction (LBC), Master-Slave Communication Mode (MSCM) a Master-Slave ID (MSID). Pokiaľ je zvolená možnosť bez regulácie, tak sú parametrom LBA a MSCM priradené hodnoty 0. Pri vyrovňovaní záťaže bol LBA = 1 a parametru LBC sa na základe meraní priradila hodnota 0,2 Hz pre prvý motor. Pre Master-Slave sa nastavila hodnota MSCM = 1 a MSID odpovedajúce jednotlivým motorom podľa toho, či predstavovali Master alebo Slave. Pri oboch metódach musel byť nulovaný hlavný parameter druhej metódy, pretože ich súčasná funkcia sa navzájom vylučovala.

Všetky spomenuté akcie sa diali pomocou vytvorenej funkcie `selectMode(iMode)`, kde parameter `iMode` bol daný zvoleným Radio Buttonom. Funkcia `selectMode` sa nachádza v prílohe A.



Obr. 34 Vzhľad vytvorenej obrazovky pre výber metódy zdieľania momentu

9.2 Konfigurácia meničov

Keďže stránka pre zmenu metódy zdieľania momentu mení iba najdôležitejšie parametre, bola vytvorená obrazovka pre konfiguráciu vybraných parametrov meničov. Pre jednotlivé parametre bolo vytvorených 6 stĺpcov, 2 pre každý menič, pri čom jedna hodnota predstavuje aktuálnu hodnotu parametra v meniči a druhá hodnota je používateľom zadávaná hodnota určená na zápis do meniča. Zápis do meničov sa realizuje tromi tlačidlami „Write“ pre každý menič v spodnej časti obrazovky.

V prípade nezhodnosti hodnôt parametra v meniči a v stĺpci na zápis, je hodnota zvýraznená, čím je používateľovi zdôraznené, že mení tento parameter v meniči. Okrem toho bolo vytvorené tlačidlo „Load“, ktoré do stĺpca zápisu nahráva hodnoty z meniča. Toto tlačidlo bolo vytvorené, pretože pri prvom spustení programu sú v stĺpci zápisu defaultné hodnoty a ak užívateľ chce zmeniť len jeden parameter, musí všetky ostatné hodnoty z meniča prepísať do tohto stĺpca. Dôvodom je, že zápis parametrov prebieha hromadne pre jednotlivé meniče.

Parameter	Drive 1		Drive 2		Drive 3	
	New Value	Value On Device	New Value	Value On Device	New Value	Value On Device
	Motor Control Type [CTT]	0	0	0	0	0
Slip Compensation [SLP]	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	100 %
Inertia Factor [SPGU]	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %	40 %
AIV1 Image Input [AIV1]	0	0	0	0	0	0
Acceleration Ramp Time [ACC]	0,8 s	20,0 s	0,8 s	20,0 s	1,0 s	1,0 s
Deceleration Ramp Time [DEC]	3,0 s	3,0 s	3,0 s	3,0 s	3,0 s	3,0 s
Torque Limit Activation [TLA]	128	128	128	128	128	128
Torque Increment [INTP]	2	2	2	2	2	2
Motoring Torque Limit [TLIM]	200 %	200 %	200 %	200 %	20 %	100 %
Generator Torque Limit [TLIG]	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	70 %
Reference Torque Assignment [TAA]	0	0	0	0	0	0
Torque Analog Limitation Active [TLC]	128	128	128	128	128	128
Load Sharing [LBA]	0	0	0	0	0	0
Load Correction [LBC]	0,0 Hz	0,0 Hz	0,0 Hz	0,2 Hz	0,0 Hz	0,0 Hz
Correction Minimal Speed [LBC1]	0 Hz	0,0 Hz	0 Hz	0,0 Hz	0 Hz	0,0 Hz
Correction Maximal Speed [LBC2]	0 Hz	0,0 Hz	0 Hz	0,0 Hz	0 Hz	0,0 Hz
Torque Offset [LBC3]	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Sharing Filter [LBF]	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms	100 ms
M/S Communication Mode [MSCM]	0	0	0	0	0	0
Master or Slave ID Selection [MSID]	1	1	2	2	1	1
M/S Number Of Slaves [MSSN]	1	1	0	0	0	0
M/S Speed Reference Output Assignment [MSSO]	0	0	0	0	0	0
M/S Torque Reference Output Assignment [MSTO]	0	0	0	0	0	0
M/S Local Mode Assignment [MSDI]	133	133	0	0	0	0
MultiDrive Link Communication Timeout [MLTO]	0,10 s	1,31 s	0,10 s	1,40 s	0,05 s	0,05 s
	Load	Write	Load	Write	Load	Write

Obr. 35 Vzhľad vytvorenej obrazovky konfigurácie meničov

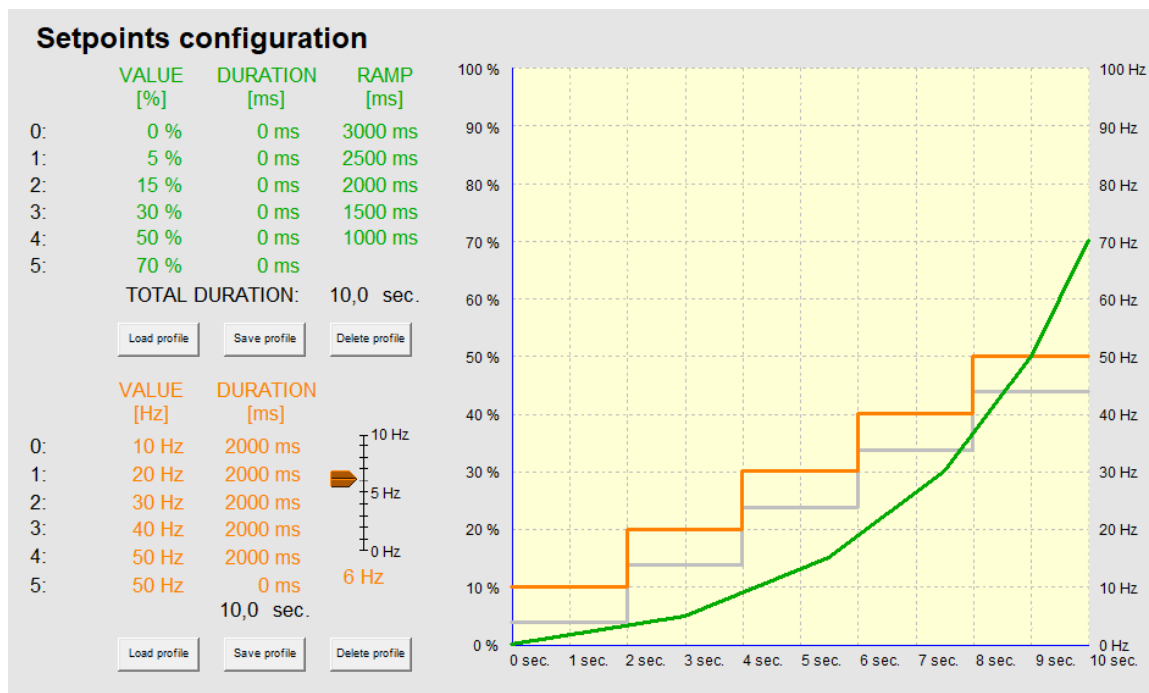
Tlačidlá Load a Write volali vytvorené funkcie loadParamsFromDev(iDrv) a writeParamsToDev(iDrv), ktoré sa nachádzajú v prílohe B.

Najprv bolo definované pole slov typu String, ktoré obsahovalo názvy všetkých parametrov, s ktorými sa pracovalo. Obe funkcie využívajú funkcie Cicodu TagRead a TagWrite. Keďže tagy vytvoreného programu sú v tvare napr. „ATV930_1_CommandRegister“, z vytvoreného poľa slov bolo potrebné tento tvar tagu vytvoriť. Funkcia writeParamsToDev zapisuje do tagu meniča interný tag, ktorý je používateľom upraviteľný. Funkcia loadParamsFromDev práve naopak zapisuje do interných tagov aktuálne hodnoty tagov meniča.

9.3 Generovanie profilov frekvencie a záťažného momentu

Stránka pre generovanie priebehov referenčnej frekvencie a momentového obmedzenia bola najzložitejšou stránkou a využívala vopred vytvorené vizualizačné komponenty od Schneider Electric. Priebeh pre moment bol vytvorený zo 6 hodnôt, ktoré mali priradené dobu trvania a dobu trvania zvyšujúcej alebo znižujúcej sa rampy. Maximálna doba trvania tohto priebehu bola 10 sekúnd. Po ukončení tejto doby zostala hodnota obmedzenia momentu na poslednej hodnote. Referenčná frekvencia sa generovala takmer rovnakým spôsobom s tým rozdielom, že sa vkladala iba doba trvania pre danú frekvenciu a nie doba trvania rampy, keďže motory majú v meniči definované vlastné rampy. Rozdiel v referenčnej rýchlosti tretieho motora a ostatných motorov bol generovaný sliderom v rozsahu od 0 do 10 Hz.

Tretí motor tak brzdil zvyšné dva, pretože jeho aktuálna frekvencia bola takmer od začiatku vyššia než jeho referenčná frekvencia. Veľkosť brzdneho momentu, bola daná momentovým limitom v generátorickom režime tohto motora. Tento limit predstavuje v meniči parameter Generative Torque Limitation (TLIG).



Obr. 36 Vzhľad vytvorenej obrazovky pre generovanie referenčnej frekvencie a zát'ažného momentu

Hodnoty zo stĺpcov Value zadaných používateľom sa ukladajú do polí torqueValues a speedValues. Hodnoty zo stĺpcov Duration a Ramp pre moment sa ukladajú do poľa torqueIntervals a hodnoty z Duration pre frekvenciu do poľa speedIntervals. Toto ukladanie realizovala funkcia InitializeArrays().

Profily frekvencie a momentu sa vypočítavajú a odosielajú do meniča až po zadaní príkazu z riadiacej stránky. Funkcia na generovanie priebehov je pomerne komplikovaná a má viacero podfunkcií. Jej kompletný obsah vrátane pomocných funkcií je v prílohe C.

Generovanie priebehov bolo rozdelené na 6 častí pre frekvenciu a 11 častí pre moment, na základe počtu časových údajov. Pre zistenie času od začiatku po danú časť v milisekundách bola vytvorená pomocná funkcia sumStageDur (iStage, iMode). Jej vstupmi sú poradové číslo časti a informácia o tom, či sa počíta trvanie pre moment (iMode = 0) alebo frekvenciu (iMode = 1). Táto funkcia tak pri hodnotách uvedených na Obr. 36 pri použití napríklad $t = \text{sumStageDur}(2,1)$ vráti hodnotu $t = 4000$.

Ďalej bola vytvorená pomocná funkcia profileStageNum(elapsedTime, iMode) pre zistenie, v ktorej časti sa počas výpočtu práve systém nachádza. Táto funkcia využíva funkciu sumStageDur a porovnáva jej hodnoty s uplynutým časom, kým nenájde vyššiu hodnotu. Podľa toho program zistí, v ktorej časti sa nachádza. Ak je funkcia volaná po ukončení všetkých fáz,

vracia hodnotu 0. Vstupmi funkcie sú doposiaľ uplynutý čas a informácia, či sa počíta fáza pre moment alebo frekvenciu. Príklad použitia: $n = \text{profileStageNum}(2500,1)$, výsledkom je $n = 2$.

Hlavná funkcia `profileCalcOut` volaná z riadiacej stránky počítala veľkosť frekvencie a momentu v cykle, kým uplynutý čas nebol vyšší ako maximum celkového trvania priebehu momentu alebo otáčok (maximálne 10 sekúnd). Pri počítaní hodnoty momentu sa najprv vyhodnotí podľa poradia fázy, či sa jedná o konštantnú hodnotu alebo rampu. Nepárne číslo fázy predstavovalo fázu konštantnej hodnoty, párne číslo fázu rampy.

Podľa toho je aktuálna hodnota buď rovná zadanej hodnote alebo sa vypočíta podľa trvania rampy a aktuálneho uplynutého času. Moment počas rampy sa počítal nasledovne:

$$M = M_{n-1} + (M_n - M_{n-1}) \frac{t_{akt} - t_{SumaFázPo(n-1)}}{t_{rampa}} \quad (23)$$

Vypočítané hodnoty momentu sa ukladajú do premennej `startupFunTorqueOutput`. Keďže pre frekvenciu nebol vytvorený stĺpec pre rampy, hodnoty sa do výstupnej premennej `startupFunSpeedOutput` zapisujú iba na základe uplynutého času a aktuálnej fázy. V závere cyklu sa vypočítané hodnoty zapisujú do interných premenných, ktoré neskôr odosiela do meniča ďalšia funkcia `profileValComm` (`speedSetpoint`, `generTorqueLimit`).

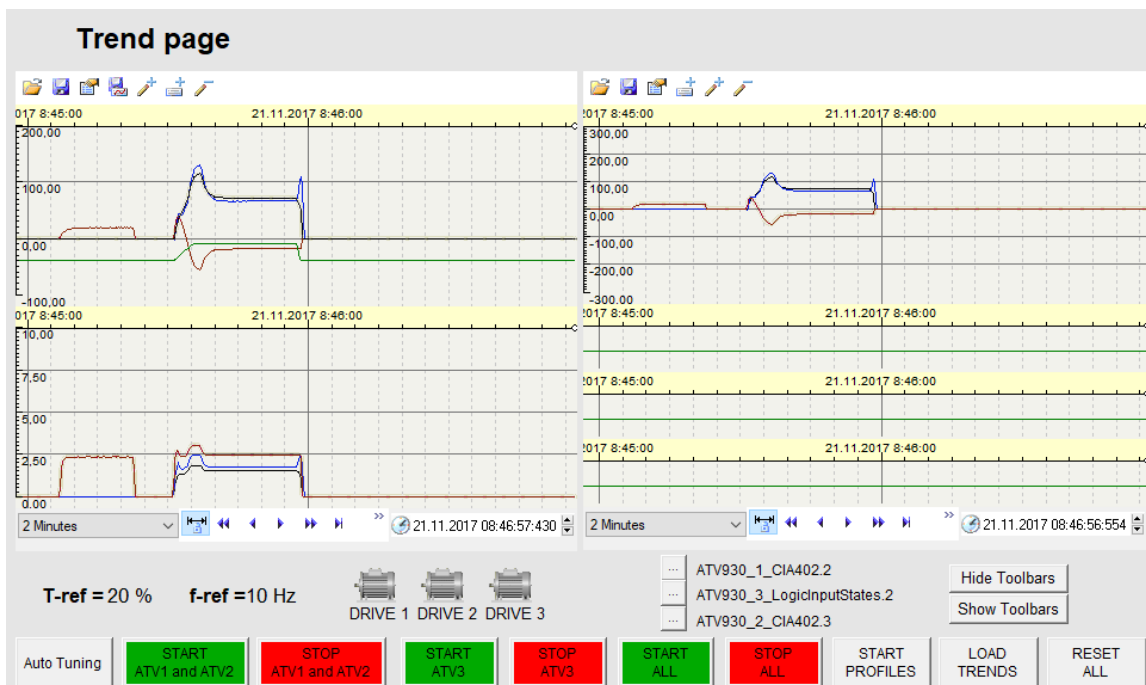
Táto funkcia je volaná každých 10 milisekúnd. To bolo zabezpečené tým, že uplynutý čas v milisekundách bol podelený žiadanou hodnotou komunikačného cyklu (10 milisekúnd) a uložený do celočíselnej premennej `commCycle`. Táto hodnota sa porovnávala s poslednou hodnotou `commCycle`, predtým uloženou do premennej `commCycle_hist`. Pokiaľ sa hodnoty líšili, prešlo už aspoň 10 milisekúnd a mohla sa zavolať funkcia `profileValComm` a uložiť aktuálna hodnota `commCycle` do `commCycle_hist`.

Tlačidlá `Load Profile`, `Save Profile`, `Delete Profile`, použitý slider ako aj vykreslenie výsledného priebehu frekvencie a momentu boli vopred pripravené firmou `Schneider Electric` a do tejto práce boli iba zakomponované.

9.4 Stránka trendov/riadiaca stránka

Stránka trendov alebo riadiaca stránka bola najdôležitejšou vytvorenou stránkou vo vizualizácii, pretože využívala všetky možnosti doteraz popisovaných stránok. Na stránke výberu metódy zdieľania momentu sa zvolili základné parametre jednotlivých metód. Na stránke konfigurácie sa nakonfigurovali meniče podrobnejšie podľa konkrétneho testu. Následne sa pripravil priebeh brzdného momentu a referenčnej frekvencie na tretej stránke.

V spodnej časti stránky trendov sú možnosti pre Reset meničov, Autotuning, zapnutie respektíve vypnutie dvojice ATV930_1 a ATV930_2, zapnutie/vypnutie ATV930_3, zapnutie/vypnutie všetkých troch meničov, spustenie nadefinovaných priebehov ako referenčných hodnôt meničom a obnovenie uloženého vzhľadu trendov. Všetky funkcie pre túto stránku sa nachádzajú v prílohe D.



Obr. 37 Vzhľad vytvorenej obrazovky trendov/riadiacej stránky

Reset meničov prebieha odoslaním hodnoty 0 do riadiaceho registra CMD. Tento Reset je potrebný vždy pri novom spustení programu, akomkoľvek inom prerušení komunikácie s meničmi alebo akejkolvek inej chybe. Tlačidlo „Load trends“ nahráva uložený vzhľad trendov zo súborov. Tento vzhľad je možné modifikovať upravením grafov a uložením do týchto súborov.

Tlačidlo „Auto Tuning“ nastavuje parameter meniča Autotuning do 1, čím sa spustí samokonfigurácia meniča pre motor, ktorý napája.

Vypnutie meničov prebieha pomocou vytvorenej funkcie stopSeq(iDrv) odoslaním hodnoty 7 do CMD, čím sa menič dostane zo stavu RUN do stavu RDY. Zapnutie meničov prebieha pomocou vytvorenej funkcie startSeq (iDrv). Parametre týchto funkcií udávajú poradové číslo meniča, ktorý sa má zapnúť/vypnúť.

Čas tOut vo funkcii startSeq predstavoval čas, do ktorého sa musí menič zapnúť. Tým sa predchádza tomu, že by sa menič z nejakého dôvodu nedokázal zapnúť a program by sa zacyklil. Na začiatku programu pred cyklom prebieha čítanie parametrov stavového a riadiaceho registra z meniča pomocou funkcie TagRead. V cykle sa na základe stavu meniča (premenná ETA) priradzujú jednotlivé príkazy (CMD) a tie sa následne odosielajú do meniča pomocou funkcie TagWrite. Zisťovanie hodnoty stavového alebo riadiaceho registru prebieha pomocou bitového súčinu s príslušnou maskou. Na konci cyklu sa vždy aktualizuje stav meniča ETA. Pri testovaní sekvencie pre štart bolo zistené, že meniče sa nezapínali pokiaľ nemali priradenú referenčnú frekvenciu medzi stavom RDY (ETA = 0x33) a RUN (ETA = 0x37). Preto bola meniču krátko pred štartom odoslaná referenčná frekvencia 1 Hz a hneď po odoslaní príkazu CMD = 0xF frekvencia 0 Hz. Vid' príloha D.

Funkcia startProfiles() volá funkciu profileCalcOut() pre spustenie profilov definovaných používateľom v prípade, že sú všetky meniče v stave RUN. Okrem toho nesmie dôjsť k dvojnásobnému spusteniu profilov a ich prekryvaniu. To zabezpečuje interný tag startupFunRng, ktorého hodnota TRUE znamená, že sa profil už vypočítava a odosiela. Tento tag sa setuje alebo resetuje iba vo funkcii profileCalcOut, vo funkcii startProfiles sa iba overuje.

Okrem všetkých doposiaľ spomenutých riadiacich funkcií boli na tejto obrazovke implementované aj ďalšie prídavné funkcie. V ľavej časti obrazovky (Obr. 37) sa zobrazuje aktuálna hodnota limitácie momentu ATV930_3 a referenčnej frekvencie motorov ATV930_1 a ATV930_2. Zobrazované sú hodnoty interných tagov GenerTorqueLimit a ReferenceFrequency. Tieto hodnoty sú modifikovateľné a po ich zmene sa volá funkcia profileValComm, aby sa odoslali do meniča.

Z dôvodu, aby mal používateľ informáciu o stave meniča, boli vložené symboly motorov, ktorých farba znázorňuje rôzne stavy. Sivá farba znamená stav meniča pripravený, zelená znamená stav RUN a červená farba stav chyby. Žltá farba predstavuje defaultný stav, teda zahŕňa všetky ostatné možnosti. Zmena farby prebiehala na základe bitových súčinov stavového registra a príslušných masiek.

Na pravej časti obrazovky (Obr. 37) sú tlačidlá „Show Toolbars“ respektíve „Hide Toolbars“ pre zobrazenie alebo skrytie panelov nástrojov trendov v hornej časti obrazovky. Tieto tlačidlá boli vytvorené, aby bola zaručená lepšia viditeľnosť priebehov veličín skrytím toolbarov.

Na obrazovku boli ešte vložené tri zadávacie polia pre bitové trendy. Po kliknutí na tlačidlo „...“ sa otvorí vyskakovacie okno, kde používateľ vyberie z použitých meničov, zo zoznamu jeho parametrov a vyberie konkrétny bit, ktorý sa má zobrazovať. Táto funkcia bola taktiež vopred pripravená firmou Schneider Electric a v tejto práci bola iba využitá.

10 Záver

Hlavnými cieľmi tejto práce bolo porovnanie metód pre zdieľanie momentu vo viacmotorovej sústave a vytvorenie vizualizačného systému pre riadenie tejto sústavy. Tieto ciele boli úspešne splnené a pozostávali z nasledujúcich častí.

V prvom rade bol vytvorený teoretický popis všetkých súčastí viacmotorového systému, ktorými boli asynchrónny motor s kotvou nakrátko, frekvenčný menič a operátorský panel. V súvislosti s asynchrónnym motorom boli popísané zmeny jeho mechanickej charakteristiky pri zmene rôznych parametrov a najčastejšie spôsoby riadenia indukčných motorov. Mechanické charakteristiky boli generované výpočtom v skripte programu MATLAB. Okrem toho bola popísaná mechanika motorov vzhľadom na ich väzbu, ktorá sa v tomto prípade dala považovať za pevnú. Keďže meniče si s IO serverom vizualizácie vymieňali informácie po Ethernete cez protokol Modbus TCP, stručne bola popísaná aj štruktúra odosielaných a prijímaných správ.

Ďalej bol vytvorený popis aplikačných funkcií meničov Altivar Process ATV 930 pre ich správne pochopenie a použitie pri konkrétnej aplikácii. Pre riadenie základných funkcií meniča je potrebná znalosť významu bitov riadiaceho a stavového registru. Preto bol vytvorený ich popis, s ktorým úzko súvisia sekvencie pre zapínanie a vypínanie meniča. Tieto sekvencie bolo neskôr nutné implementovať do riadiaceho programu vizualizácie.

Okrem riadiaceho a stavového slova bolo poukázané na viaceré parametre meniča ovplyvňujúce správanie sa pohonov v sústave ako kompenzácia sklzu, IR kompenzácia alebo korekcia záťaže. Pre overenie funkcií kompenzácie sklzu a IR kompenzácie bol testovaný motor o výkone 5,5 kW, ktorého výsledky ukázali praktický význam týchto funkcií a teda udržiavanie konštantných otáčok pri rôznych veľkostiach záťaže. Pre správne nastavenie meničov pri zdieľaní momentu boli taktiež popísané parametre súvisiace s metódou Load Sharing respektíve Master-Slave a ich správna konfigurácia pre jednotlivé metódy zdieľania momentu.

V ďalšej časti boli tieto metódy popísané s nameranými výsledkami, výhodami a nevýhodami. Metóda bez regulácie sa vyznačuje nízkymi nákladmi, potenciálnou nestabilitou a je použiteľná iba v prípade rovnakých motorov. V tomto prípade mali motory identické štítkové údaje, no napriek tomu bol ich momentový rozdiel v rozmedzí približne 5 – 13% pri frekvencii 30 Hz. Momentový rozdiel závisel predovšetkým na zaťažení motorov. Okrem toho bolo poukázané na veľmi nevyhovujúce výsledky pri použití funkcie kompenzácie sklzu.

Metóda Load Sharing využíva parameter korekcie záťaže pre motor so strmšou stabilnou časťou mechanickej charakteristiky, ktorým sa docieľuje lepšie rozloženie momentu. Vzhľadom

na momentové rozdiely v ustálených stavoch bol navrhnutý parameter korekcie pre rôzne zaťaženia, čím sa dosiahlo zníženie tohto rozdielu na maximálne 1,7%. Táto korekcia však opäť platí len pre ustálené stavy a nijakým spôsobom nezaručuje stabilitu viacmotorového systému. Táto metóda je nákladnejšia, keďže vyžaduje použitie dvoch meničov, no je použiteľná aj na rozdielne motory.

Metóda Master-Slave sa používa pri pevnej väzbe pohonov a jej správne použitie zabezpečuje stabilitu systému. Master a Slave spolu komunikujú a Slave prispôbuje svoje parametre aktuálnym veličinám Mastera. Slave sa prepína medzi módom regulácie momentu alebo otáčok, podľa rozdielu referenčných a aktuálnych otáčok. Pokiaľ motory bežia na referenčnej rýchlosti, Slave je v móde regulácie momentu a snaží sa dosiahnuť percentuálne rovnaký moment ako Master. Nameraný momentový rozdiel najviac dosahoval približne 6% a jeho veľkosť závisela od vnútorných regulačných štruktúr meniča Slave.

V poslednej časti práce je popísaná vytvorená vizualizácia pre operátorský panel v programe Citect Studio. Vizualizácia obsahovala stránky pre výber metódy zdieľania momentu, pre konfiguráciu meničov, stránku pre nastavenie momentových a frekvenčných profilov a stránku trendov. Okrem funkcie jednotlivých elementov bol popísaný aj spôsob ich vytvorenia, ktorý zahŕňal programovanie v Cicode. Kódy použité v jednotlivých stránkach sú uvedené v prílohách.

Z vytvorenej vizualizácie tak používateľ môže vyberať z troch možností zdieľania momentu, následne konfigurovať menič, nastaviť štartovacie profily frekvencie a záťažného momentu a pozorovať výsledky na stránke trendov. Na DVD nosič boli vložené videoukážky funkcií vizualizácie v priečinku Videodokumentácia a taktiež fotografie kompletnej sústavy v priečinku Fotodokumentácia.

11 Prílohy

A. Funkcia selectMode(iMode)

```
FUNCTION selectMode(INT iMode)

    SELECT CASE iMode
    CASE 0
        ATV930_1_LoadSharing = 0;
        ATV930_2_LoadSharing = 0;
        ATV930_1_MSCommMode = 0;
        ATV930_2_MSCommMode = 0;
    CASE 1
        ATV930_1_LoadSharing = 1;
        ATV930_1_MSCommMode = 0;
        ATV930_2_LoadSharing = 1;
        ATV930_2_MSCommMode = 0;
        ATV930_1_LoadCorrection = 0.2;
        ATV930_2_LoadCorrection = 0;
    CASE 2
        ATV930_1_LoadSharing = 0;
        ATV930_1_MSCommMode = 1;
        ATV930_2_LoadSharing = 0;
        ATV930_2_MSCommMode = 1;
        ATV930_1_MSIdSelection = 1;
        ATV930_2_MSIdSelection = 2;
    END SELECT

    IF (iMode=0 AND (CurrentMode = 1 OR CurrentMode = 2)) OR (iMode<>0
        AND (CurrentMode = 0)) THEN
        Message("NOTE","Please ensure manual switch is also in correct
            position.",48)
    END
    CurrentMode = iMode;
END
```

B. Funkcie writeParamsToDev(iDrv), loadParamsFromDev(iDrv)

```
STRING pars[27] = "SlipCompensation", "CommandRegister",  
"LogOutputStates", "InertiaFactor", "MotorControlType", "LoadSharing",  
"LoadCorrection", "CorrMinSpeed", "CorrMaxSpeed", "TorqOffset",  
"SharingFilter", "AccRampTime", "DecRampTime", "TorqLimActivation",  
"TorqIncrement", "MotorTorqLimit", "GenerTorqLimit",  
"RefTorqAssignment", "TorqAnalogLimAct", "AIV1ImageInput",  
"MSCommMode", "MSIdSelection", "MSNumberOfSlaves",  
"MSSpeedRefOutAssign", "MSTorqRefOutAssign", "MSLocalModeAssign",  
"MultiDrLinkCommTimeout"
```

```
FUNCTION writeParamsToDev(INT iDrv)  
  INT i;  
  STRING sTagVal_INT, sTagVal;  
  
  FOR i=0 TO 26 DO  
    sTagVal_INT =  
      TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_"+pars[i]+"_INT")  
    sTagVal = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_"+pars[i])  
    IF sTagVal <> sTagVal_INT THEN  
      TagWrite("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_"+pars[i],sTagVal_INT)  
    END  
  END  
END  
END
```

```
FUNCTION loadParamsFromDev(INT iDrv)  
  INT i;  
  STRING sTagVal;  
  
  FOR i=0 TO 26 DO  
    sTagVal = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_"+pars[i])  
    TagWrite("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_"+pars[i]+"_INT",sTagVal);  
  END  
END  
END
```

C. Funkcie sumStageDur (iStage, iMode), profileStageNum (elapsedTime, iMode), profileCalcOut() a profileValComm (speedSetpoint, generTorqueLimit)

```

INT
FUNCTION sumStageDur(INT iStage, INT iMode) //iStage from 1 , iMode=0
torque, iMode=1 speed
    INT j,t = 0;
    FOR j=0 TO iStage-1 DO
        IF iMode = 0 THEN
            t = t + torqueIntervals[j]
        ELSE
            t = t + speedIntervals[j]
        END
    END
    END
    RETURN t
END

```

```

INT
FUNCTION profileStageNum(INT elapsedTime,INT iMode) //iMode=0 torque,
iMode=1 speed
    INT arraySize,i,j,t;

    IF iMode = 0 THEN
        arraySize = 11;
    ELSE
        arraySize = 6;
    END

    FOR i=1 TO arraySize DO
        t = sumStageDur(i, iMode)
        IF t > elapsedTime THEN
            RETURN i;
        END
    END
    RETURN 0
END

```

```

FUNCTION profileCalcOut()
    INT startTime, startTime2, elapsedTime, n, commCycle,
    commCycle_hist
    startupFunRng = 1; //profile is running

    initializeArrays(); //inputs variables from table to arrays
    startTime = SysTime();
    elapsedTime = 0;

    WHILE elapsedTime < Max(torqueProfileDur,speedProfileDur) DO
    // Caclulate outputs in a cycle

```

```

//Torque
n = profileStageNum(elapsedTime,0);
IF torqueProfileDur > 0 THEN
    IF n=1 OR n=3 OR n=5 OR n=7 OR n=9 OR n=11 THEN //duration
        startupFunTorqueOutput = torqueValues[(n+1)/2-1];
    ELSE
        IF n=2 OR n=4 OR n=6 OR n=8 OR n=10 THEN //ramp
            IF torqueIntervals[n-1]<>0 THEN
                startupFunTorqueOutput = torqueValues[n/2-1] +
                    (torqueValues[n/2]-torqueValues[n/2-1])*
                    ((elapsedTime-sumStageDur(n-1,0))/
                    torqueIntervals[n-1] );
            ELSE //time for ramp is 0
                startupFunTorqueOutput = torqueValues[n/2]
            END
        END
    END
END
END

//Speed
n = profileStageNum(elapsedTime,1);
IF speedProfileDur > 0 THEN
    startupFunSpeedOutput = speedValues[n-1];
END

//Saving to internal tags
ReferenceFrequency = startupFunSpeedOutput
generTorqLimit = startupFunTorqueOutput

startTime2 = startTime; //SysTimeDelta erases startTime2
elapsedTime = SysTimeDelta(startTime2)
commCycle = elapsedTime/10 // communication rate
IF commCycle <> commCycle_hist THEN //commCycle and
                                     commCycle_hist are integers
    profileValComm(ReferenceFrequency,generTorqLimit)
END
commCycle_hist = commCycle
END
startupFunRng = 0; //profile is not running
END

FUNCTION profileValComm(INT speedSetpoint, INT generTorqLimit)
    //Sends values to ATVs
    ATV930_1_ReferenceFrequency = speedSetpoint;
    ATV930_2_ReferenceFrequency = speedSetpoint;
    ATV930_3_ReferenceFrequency = speedSetpoint-HzDeltaN;
    ATV930_3_GenerTorqLimit = generTorqLimit;
END

```

D. Funkcie startSeq (iDrv), stopSeq (iDrv), startProfiles ()

```
FUNCTION startSeq(INT iDrv) //iDrv drive index 1,2,3
  INT startTime, ETA, CMD, tOut=0

  startTime = SysTime();

  CMD = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_CommandRegister")
  ETA = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_CIA402")

  WHILE NOT((ETA BITAND 0x37)=0x37) AND NOT tOut DO //while not
    running or time>1000

    IF ((ETA BITAND 0x33)=0x33) THEN //atv state = rdy,fst
      IF NOT ((CMD BITAND 0xF)=0xF) THEN //command run
        TagWrite("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+
          "_ReferenceFrequency", "1");
        CMD = 0xF;
        TagWrite("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+
          "_ReferenceFrequency", "0");
      END
    END

    IF ((ETA BITAND 0x31)=0x31) THEN //atv state = rdy
      IF NOT ((CMD BITAND 0x7)=0x7) THEN CMD = 0x7 END;
    END

    IF ((ETA BITAND 0x50)=0x50) THEN //atv state = nst
      IF NOT ((CMD BITAND 0x6)=0x6) THEN CMD = 0x6 END;
    END

    TagWrite("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+
      "_CommandRegister", IntToStr(CMD));

    tOut = (SysTime() - startTime) > 1000
    SleepMS(20);
    ETA = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_CIA402")
  END

END

FUNCTION stopSeq(INT iDrv) //iDrv drive index 1,2,3
  INT startTime, ETA, CMD

  startTime = SysTime();

  CMD = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_CommandRegister")
  ETA = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_CIA402")

  WHILE ((ETA BITAND 0x37)=0x37) AND (SysTime() - startTime) < 500 DO
    //while atv doesn't stop or time>500

    IF ((CMD BITAND 0xF)= 0xF) THEN //if atv running
      CMD = 0x7; //cmd stop
    END
  END
END
```



```

        END

        TagWrite("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+
            "_CommandRegister",IntToStr(CMD));
        SleepMS(20);
        ETA = TagRead("ATV930_"+IntToStr(iDrv)+"_CIA402")
    END
END

FUNCTION startProfiles()
    IF ((ATV930_1_CIA402 BITAND 0x37)=0x37) AND ((ATV930_2_CIA402
        BITAND 0x37)=0x37) AND ((ATV930_3_CIA402 BITAND 0x37)=0x37)
        THEN
            IF NOT startupFunRng THEN
                profileCalcOut();
            ELSE
                Message("ERROR","PROFILE FUNCTION ALREADY IN PROGRESS",48)
            END
        ELSE
            Message("ERROR","NOT ALL DRIVES ARE RUNNING",48)
        END
    END
END

```

12 Zoznam použitej literatúry

- [1]. VOŽENÍLEK, Petr – NOVOTNÝ, Vladimír – MINDL, Pavel. Elektromechanické měniče. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-04875-7.
- [2]. POLIAK, František – FEDÁK, Viliam – ZBORAY, Ladislav. Elektrické pohony. Bratislava: ALFA – Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1987.
- [3]. ZÁSKALICKÝ, Pavel. Elektrické stroje [online]. Košice: Technická Univerzita v Košiciach, 2015. [vid. 18.11.2017]. ISBN 978-80-553-2117-2. Dostupné z: <http://kem.fe.i.tuke.sk/docs/5710-1474282660-elektrickestroje-ver-02.pdf>
- [4]. Rotor Conductors of Squirrel Cage. In: Etrical [online]. Etrical, © 2017. [vid. 13.11.2017]. Dostupné z: <https://etrical.blogspot.cz/2016/05/rotor-conductors-induction-machine.html>
- [5]. CAHA, Zdeněk – ČERNÝ, Miroslav. Elektrické pohony. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-30-00418-7.
- [6]. TIMKO, Jaroslav – ŽILKOVÁ, Jaroslava – DUDRIK, Jaroslav – GIROVSKÝ, Peter. Elektrické akčné členy a pohony. Košice: Technická univerzita, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2009. ISBN 978-80-553-0168-6.
- [7]. SEBORSKÝ, Stanislav. Elektrické pohony a výkonová elektronika. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989.
- [8]. MOHAN, Ned – UNDELAND M. Tore – ROBBINS P. William. Power Electronics - Third edition. USA: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0-471-42908-2.
- [9]. KINLOVIČ, Jakub. Riadenie priemyselného meniča pomocou PLC Simatic. Košice, 2015. Bakalárska práca. Technická Univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky a mechatroniky.
- [10]. FRANEKOVÁ, Mária – KÁLLAY, Fedor – PENIAK, Peter – VESTENICKÝ, Peter. Komunikačná bezpečnosť priemyselných sietí. EDIS: Žilinská Univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-715-6.
- [11]. HMIDID7DT0. In: Scheider Electric ECat [online]. Schneider Electric, © 2017. [vid. 13.11.2017]. Dostupné z: http://www.ops-ecat.schneider-electric.com/ecatalogue/browse.do?cat_id=BU_AUT_1469_L3&el_typ=product&nod_id=0000000002&prd_id=HMIDID7DT0&scp_id=Z000

- [12]. PAPOUCH, Pavel: Ethernet nahrazuje klasické průmyslové komunikační linky [online]. AUTOMA - časopis pro automatizační techniku, s. r. o., 07/2006. Dostupné na internete: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/ethernet-nahrazuje-klasicke-prumyslove-komunikacni-linky-2006_07_31237_1503/
- [13]. Modbus Training. Telemecanique, 2004. Prezentácia PhW - Modbus_en 03/2004.
- [14]. SCHNEIDER ELECTRIC [online]. Altivar Process Variable Speed Drives ATV930, ATV950, ATV960, ATV980, ATV993 Programming Manual. © 2017. [vid. 20.11.2017]. Dostupné z: http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/300000/FA300078/en_US/ATV900_Programming_Manual_EN_NHA80757_02.pdf
- [15]. ATV630U75N4_S2_IP21. In: Graybar [online]. Graybar, © 2017. [vid. 13.11.2017]. Dostupné z: http://www.graybarindustrial.com/wp-content/uploads/2015/11/PF130995A_ATV630U75N4_S2_IP21.jpg