

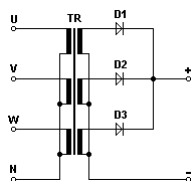
## Závěrečná zpráva projektu specifického výzkumu - zakázka č. 2128

### Název projektu: Výkonový stejnosměrný napájecí zdroj se středofrekvenční transformátorovou kompenzací rušivého napětí s vysokou přetížitelností

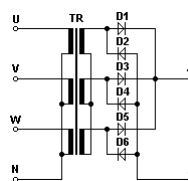
Odpovědný řešitel: doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc.  
Studenti doktorského studia na PdF UHK: Ing. Miloš Sobek  
Studenti magisterského studia na PdF UHK: Petr Motyčka, Jan Wild  
Celková částka přidělené dotace: 41 000 Kč

#### Východiska projektu

Výkonové třífázové zdroje stejnosměrného napětí jsou doposud konstruovány v historicky ustálených zapojeních, které tvoří vstupní transformátor a usměrňovač. Na sekundární straně (obvykle zapojené do hvězdy (Y)) je jednocestný (třífázový) nebo dvojcestný (šestifázový) usměrňovač (obr.1, 2) [1].



**Obr.1 Třífázový transformátor Yy, jednocestný (třífázový) usměrňovač**



**Obr.2 Třífázový transformátor Yy, dvojcestný (šestifázový) usměrňovač**

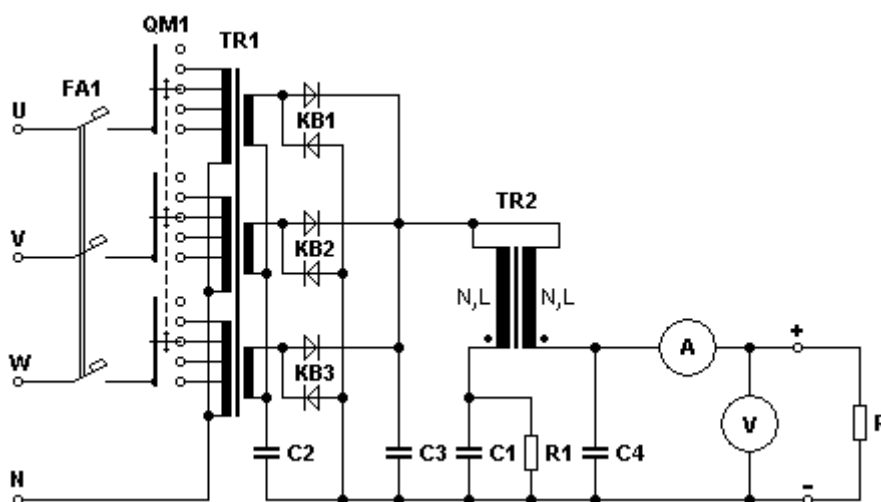
Návrh třífázového zdroje vychází z původní výzkumné práce, realizované s institucionální podporou vědy a výzkumu na katedře technických předmětů, a ověřených výsledků realizovaného funkčního vzorku jednofázového stejnosměrného zdroje s transformátorovým filtrem [2], [3]. Cílem projektu bylo ověření použitelnosti středofrekvenčního transformátorového filtru pro napájecí proudy v řádu desítek až stovek ampérů, s výhledem jeho aplikace do oblasti stejnosměrné trakce, napájené z třífázového trojvinutového transformátoru s dvanáctifázovým usměrňovačem. Navržený zdroj využívá transformátorovou kompenzaci na 6. harmonické síťové frekvence a je tedy navržen pro pracovní frekvenci 300 Hz. Návrh zdroje vychází z požadavku vysoké spolehlivosti v těžkých provozních podmínkách, kde může docházet k výraznému krátkodobému přetěžování. Výzkumným záměrem je rovněž experimentální ověření predikovaných parametrů teoretického návrhu transformátorového kompenzátoru pro třífázové napájecí zdroje s šestifázovým usměrňovačem. Jednoduchá konstrukce a dimenzování prvků musí v provozu zajistit minimálně 100% krátkodobou přetížitelnost, a to po dobu pěti až patnácti minut, bez nutnosti nákladného jištění sekundární strany.

#### Postup řešení projektu

Řešení zdroje je formálně nezávislé na elektrických parametrech. Princip transformátorové kompenzace je použitelný pro libovolná vstupní a výstupní napětí a pro výstupní proudy až 100 kA. Přednostní nasazení takto konstruovaných napájecích zdrojů však předpokládáme zejména pro oblast malých a nízkých napětí a velkých proudů. Navržený napájecí zdroj je určen pro všechny aplikace, u nichž nevedí mírné kolísání výstupního napětí se změnou zatížení, ale prvořadým požadavkem je vysoká provozní spolehlivost, odolnost v těžkých provozních podmínkách, krátkodobá 100% přetížitelnost v čase několika minut a malé rušivé napětí na výstupu zdroje. Zdroj je navržen do těžkých podmínek průmyslového provozu a zemědělství, ale není vyloučeno jeho využití i v komerční sféře. Při návrhu zdroje bylo uvažováno i s tím, že jeho výstupní voltamérová charakteristika by měla být srovnatelná s voltampérovou charakteristikou olověného akumulátoru. Napájecí zdroj tak může být použit jako zdroj startovacího proudu pro malá a střední vozidla a lehké traktory. Zdroj je (s výjimkou usměrňovače) sestaven výhradně z pasivních prvků a využívá konvenční chlazení. Konkrétním výstupem výzkumného záměru je realizace funkčního vzorku napájecího zdroje s výstupním napětím 14-12 V při trvalém zatížení výstupním proudem v rozsahu 80-120 A, přičemž rušivé napětí na výstupu zdroje by mělo být v řádu set milivoltů.

Třífázový vstupní transformátor TR1 v zapojení Yy, s nucenou symetrií na primární straně, je k distribuční síti připojen přes jistič primární strany FA1. Radič QM1 plní funkci hlavního vypínače a zároveň slouží k přizpůsobení zdroje napájecí síti. Přepínání odboček primárního vinutí umožňuje jemnou regulaci výstupního napětí v rozsahu  $\pm 5\%$ . Vstupní transformátor napájí šestifázový usměrňovač, který tvoří trojice výkonových křemíkových usměrňovacích bloků KB1-KB3 (obr.3). Střed hvězdy sekundárního vinutí je připojen přes kondenzátor C2, který symetrizuje chod usměrňovače a blokuje parazitní přechodové děje při komutaci diod. Usměr-

něné kladné stejnosměrné napětí s malou superponovanou střídavou složkou napětí z usměrňovače se přivádí na kompenzační transformátor TR2 s převodem 1:1. Obě vinutí kompenzačního transformátoru mají stejný počet závitů  $N$  a indukčnost  $L$ . Vzhledem ke kompenzačnímu transformátoru se usměrňovač chová jako frekvenční násobič. Primární vinutí kompenzačního transformátoru je připojeno na střídavou složku výstupního napětí usměrňovače, stejnosměrná složka je oddělena od země kondenzátorem C1. Stejnoscenná složka prochází přes sekundární vinutí na výstup zdroje a na zátěž  $R$ . Střídavá složka sekundárního napětí je zapojena do série s primárním napětím tak, aby se tyto složky navzájem odečítaly. Kondenzátor C3 na výstupu usměrňovače tlumí přechodové zákmity při komutaci diod, protože primární indukčnost  $L$  kompenzačního transformátoru TR2 a kapacita C1 představují sériový LC člen. Při zapojení zdroje do sítě tak na kondenzátoru C1 vznikne až dvojnásobný překmit napětí, který tlumí rezistor R1. V odůvodněných případech lze pro výraznější omezení překmitu použít aktivní omezovač nebo zátěž  $R$  připojovat až po zapnutí zdroje. Rezistor R1 zajišťuje také nutný minimální trvalý odběr proudu ze zdroje. Bez něho by došlo k nabití kondenzátoru C1 až na vrcholovou hodnotu střídavého napětí  $U_2$ . Vlivem proměnného odběru a dalším vlivům (fázové posuvy na kompenzačním transformátoru TR2) není kompenzace střídavé složky usměrňovače zcela ideální a zvlnění na výstupu zdroje bývá obvykle větší, než uvádějí jednoduché simulační modely. Pro přísnější požadavky na výstupní zvlnění je proto na výstupní svorky zdroje připojen navíc blokovací kondenzátor C4, který toto zvlnění snižuje přibližně o jeden řád.



Obr.3 Principiální schéma zapojení třífázového zdroje 12 V/200 A

Klíčovým problémem návrhu zdroje je optimalizace kompenzačního transformátoru, která spočívá v nalezení kompromisu protichůdných požadavků mezi magnetickým odporem jádra (průřezem magnetického obvodu a délkou střední siločáry), odporem vinutí a povolenou magnetickou indukcí. Uzavřené magnetické jádro kompenzačního transformátoru je podle [2] stejnosměrně syceno na úroveň

$$B_{DC} = \frac{\mu_0 \mu_r N I_{DC}}{l_s}, \text{ ke které se připočítává sycení } B = \frac{\mu_0 \mu_r N I_{\mu}}{l_s} \text{ od harmonických složek}$$

$$U(\omega t) = \frac{3U_m \sqrt{3}}{\pi} \cdot \left( 1 - \frac{2}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \frac{2}{11 \cdot 13} \cos 12\omega t - \frac{2}{17 \cdot 19} \cos 18\omega t - \dots \right) \text{ na výstupu usměrňovače.}$$

Zpřesněné výpočty, opakované simulace a konzultace s technologem výroby BV Elektronik Holice vedly k tomu, že bylo nutné změnit konstrukční řešení kompenzačního transformátoru. Oproti předpokládanému jádru EI 128×75 v projektovém záměru muselo být použito dvousloupkové jádro UI 70×88 s paralelním bifilárním vinutím. Změna konstrukčního řešení je v případě technického vývoje průvodním jevem, s nímž je třeba vždy do jisté míry uvažovat. V případě projektů specifického výzkumu však nelze vytvářet rozpočtovou rezervu pro případ nutné výměny nebo variantní úpravy dílů. Změna konstrukčního řešení si tak následně vyžádala úpravy celého návrhu mechanické části napájecího zdroje. Proto již nebylo možné použít plánovaný transpotní rack 6HE 19", ale bylo nutné navrhnout novou přístrojovou skříň. Tato změna vedla i ke změnám ve struktuře financování projektu.

V důsledku potřebných konstrukčních a technologických změn a nutného dodržení posloupnosti jednotlivých kroků administrativního postupu při objednávání materiálu, došlo (zejména v průběhu letních prázdnin) k ča-

sovému skluzu oproti původně plánovanému harmonogramu. Časové prostoje ale byly využity pro přípravu a realizaci publikačních výstupů a jednání s dodavateli. Cenové nabídky mají obvykle platnost 1 měsíc někdy je problematické tento termín administrativně zvládnout. V průběhu listopadu byly zpracována dokumentace mechanické části. Do 15. prosince byly dodány veškeré komponenty a potřebný konstrukční materiál, uzavřena fakturace od dodavatelů a zahájena výroba přístrojové skříně. Finální montáž předpokládáme koncem ledna 2013. Následně budou provedena výkonová měření a zátěžové testy v laboratořích Katedry technologií a měření FEL ZČU Plzeň.

## Dosažené výsledky

Návrh třífázového zdroje se středofrekvenčním transformátorovým kompenzátozem byl představen na mezinárodní vědecké konferenci The 12<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages and Electric Machines - POWER '12 v Praze.

Měření na funkčním vzorku jednofázového zdroje ukázala, že už fázový posuv o velikosti 1° mezi primárním a sekundárním napětím kompenzačního transformátoru zvětšuje rušivé napětí na výstupu v řádu desítek milivoltů.

Teoretickým výstupem projektu je metodika návrhu kompenzačního transformátoru s uzavřeným magnetickým obvodem s vysokým stejnosměrným sycením, kdy jedním z klíčových požadavků je minimální (ideálně nulový) fázový posuv mezi primárním a sekundárním napětím.

## Použité zdroje

- [1] HARLOW, J. H. ed. *Electric power transformer engineering*. Boca Raton. CRC. 2007. ISBN 978-0-8493-9186-6.
- [2] LOKVENC, J. - DRTINA, R. *Power supply voltage with the transformer ripple filter*. In WSEAS/IASME - Power '11. Penang, Malaysia, 2011. s.60-64. ISBN 978-1-61804-041-1.
- [3] LOKVENC J. - DRTINA R. *Netradiční zapojení zdroje stejnosměrného napětí s transformátorovým filtrem*. In Elektro, roč.22, č.4, s.10-11, č.5, s.12-14. Praha. FCC Public, 2012. ISSN 1210-0889.

## Výstupy projektu

V rámci řešení projektu byly zpracovány následující publikace:

ID 43866838 - výsledek kategorie J<sub>rec</sub>

LOKVENC J. - DRTINA R. *Netradiční zapojení zdroje stejnosměrného napětí s transformátorovým filtrem*. In Elektro, roč.22, č.4, s.10-11, č.5, s.12-14. Praha. FCC Public, 2012. ISSN 1210-0889.

ID 43866988 - výsledek kategorie D

LOKVENC, J. - DRTINA, R. - SOBEK, M. *Three-phase high overload DC power supply voltage with the mid frequency transformer ripple filter*. In POWER '12 Proceedings of the 12<sup>th</sup> WSEAS international conference on electric power systems, high voltages, electric machines. Athens: World scientific and engineering academy and society, 2012, s. 29-34. ISBN 978-1-61804-128-9.

Po dokončení finální montáže zdroje a ověření dosažených parametrů budou výsledky měření a testů spolu s teoretickými předpoklady a principem návrhu zpracovány pro publikování v odborném časopisu pro silnoproudou elektrotechniku Elektro, vydavatelství FCC Public Praha. Ve spolupráci s oddělením VaV PdF bude napájecí zdroj registrován jako výsledek typu G - funkční vzorek.

## Přehled realizovaných výdajů

- osobní náklady nebyly pro administrativní náročnost a nutné odvody nárokovány.
- stipendia ve výši 2 × 2 000 Kč byla přiznána za pomoc při řešení úkolu, zejména při přípravě náhradních schémat elektrických a magnetických obvodů pro simulace a vyhledávání potřebných údajů v databázích studentům ID 20044 Petr Motyčka a ID 20048 Jan Wild.
- odměna 4 000 Kč byla přiznána na DPP pro doktoranda ID 28901 Ing. Miloš Sobek za pomoc při přípravě simulací a za autorskou spolupráci na příspěvku pro konferenci POWER '12, přípravu konferenčního vystoupení a jeho prezentaci.
- materiálové náklady představuje nákup elektrických a mechanických dílů, spojovacích vodičů, spojovacího materiálu, kabelové konfekce a technologických doplňků. Přehledný rozpis základních položek je v tab.1.

Přidělená dotace ve výši 41 000 Kč byla po nutných úpravách projektu zcela vyčerpána a projekt byl se souhlasem oddělení vědy a výzkumu PdF dofinancován z prostředků institucionální podpory vědy a výzkumu. Podrobný přehled je uveden v tabulce 1.

**Tab.1 Přehled nákladů projektu 2128**

položka	n mj	cena/mj	náklady
třífázový napájecí transformátor	1	8 580,00	8 580,00
kompensační transformátor	1	6 140,40	6 140,40
diodový modul SKKD 162/16 + chladič H+ 8266/240/FR	3		7 928,60
měřicí přístroj PQ96K	2	740,00	1 480,00
bočník 200 A/60 mV	1	540,00	540,00
rezistor ATE 2R7/50 W	2	124,17	248,34
vysokokapacitní kondenzátor 22m0/63 V	1	540,00	540,00
vysokokapacitní kondenzátor 47m0/40 V	2	549,17	1 098,34
kondenzátor 470μ/250 V	1	165,83	165,34
kondenzátor 47μ0/400 V	1	106,67	106,67
stupnice 15 V pro PQ96K	1	198,00	198,00
vačkový spínač VSR16 s příslušenstvím	1	963,00	963,00
vodiče, kabelová konfekce, přípojka 16/32 A			3 096,15
doplňkový elektromateriál			1 014,16
CU přípojnice - doplaceno ze SV 2129	5	1 680,00	934,00
stipendia - ID 20044, ID 20048	2	2 000,00	4 000,00
DPP - ID 28901	1	4 000,00	4 000,00
<b>celkové náklady</b>			<b>41 033,00</b>
<b>přečerpáno</b>			<b>33,00</b>
přístrojová kolečka - placeno z VaV KTP	4	178,00	712,00
AL profily pro přístrojovou skříň - placeno z VaV KTP			2 396,00
TEXTIT - přířezy pro přístrojovou skříň - placeno z VaV KTP			6 629,00

## Závěr

Přes zdánlivě relativní jednoduchost zapojení napájecího zdroje se středofrekvenční transformátorovou kompenzací rušivého napětí vyžaduje návrh tohoto typu zdroje podrobnou analýzu stejnosměrně syceného magnetického obvodu se superponovanou složkou vyšších harmonických. Principiálně se jedná o tlumený sériový LC obvod s těsnou transformátorovou vazbou, napájený zvlněným stejnosměrným napětím ze zdroje s malým vnitřním odporem. Jedná o jednoduchý a spolehlivý zdroj, určený zejména do těžkých provozních podmínek. Robustnost zdroje daná použitím dvou transformátorů nemusí být na závadu u průmyslových stacionárních instalací, zdrojů pro napájení stejnosměrných SELV a PELV sítí, rozvodů malého a nízkého napětí, zdrojů pro trakční použití nebo galvanotechniku.

Využití zdroje lze předpokládat také pro pokusy a výkonová měření ve školních laboratořích, a to zejména na středních a vysokých školách elektrotechnického zaměření. Další aplikační možností je startování spalovacích motorů za obtížných klimatických podmínek, zejména ve stavebnictví a zemědělství, kdy stabilita výstupního napětí a jeho malé zvlnění přispívá ke klidnému chodu stejnosměrných sériových motorů, neohrožuje akumulátor stroje nebo vozidla průchodem vysokého proudu a stejně tak nepředstavuje riziko průrazu alternátorových diod přepětím v případě náhlého odlehčení.

Datum: 29. prosince 2012

doc. Ing. Jaroslav Lokvenc, CSc.