

Zabezpečenie napájania kontinuálnych procesov s využitím zariadení FACTS

Branislav Dobrucký, Róbert Šul, Pavol Špánik

Príspevok sa zaoberá problematikou kritických procesov vo výrobe s nepretržitou prevádzkou (napr. lakovania, zvárania), keď musia mať zabezpečené napájanie, pretože aj pri krátkodobých výpadkoch môže byť ohrozená činnosť ich riadiacich systémov a tým spôsobená škoda vo výške až niekoľko miliónov eur. Príslušné zariadenia výkonovej elektroniky, akými sú napr. dynamický reštaurátor (obnovovač) napätia – DVR, zdroj nepretržitého napájania – UPS, výkonový aktívny sériový filter – PASF alebo univerzálny regulátor toku výkonov – UPFC, sú schopné spolu so snímacími a vyhodnocovacími obvodmi tieto problémy riešiť, a tak uvedeným výpadkom a stratám predchádzať. V článku sú ukázané simulačné experimenty z pôsobenia dynamického reštaurátora napätia a univerzálného regulátora toku výkonu, ako aj elektronické prepínanie napäťových zdrojov s využitím UPS.

Úvod

Pri výrobe automobilov sa stretávame s kontinuálnymi výrobnými procesmi, ktoré sú z hľadiska zabezpečenia nepretržitého napájania elektrickou energiou kritické (lakovanie, zváranie ap.). Roboty a manipulátory týchto prevádzok ovládajú automatické systémy riadenia (PLC automaty, riadiace PC, FPGA kontroléry, riadiaca elektronika), citlivé aj na krátkodobé poklesy a prerušenia napájacieho napätia (obr. 1). Takisto výkonové akčné členy robotov a manipulátorov (v prevažnej miere rotačné a lineárne elektrické motory) môžu pri prerušení vykazovať stratu momentu, ale aj synchronizácie. Aby sme zabránili stratám, ktoré by vznikli pri prerušení výroby, treba zabezpečiť nepretržité napájanie automatických systémov riadenia s využitím zariadení výkonovej elektroniky, medzi ktoré patria zariadenia FACTS (Flexible AC transfer systems):

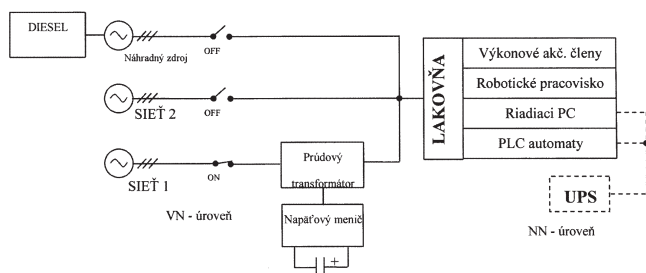
- dynamický reštaurátor napätia (DVR – Dynamic Voltage Restorer),
- výkonový aktívny sériový filter (PASF – Power Active Serial Filter),
- univerzálny regulátor toku výkonov (UPFC – Unified Power Flow Controller),
- zdroj nepretržitého napájania (UPS – Uninterruptible Power Supply),

prípadne ďalšie typy, resp. ich kombinácie.

Pritom z hľadiska kvality dodávanej elektrickej energie sú okrem klasických ukazovateľov [2] definované aj napäťové charakteristiky a poklesy napätia [1].

Aktívna dynamická obnova napätia s využitím zariadení DVR, príp. PASF

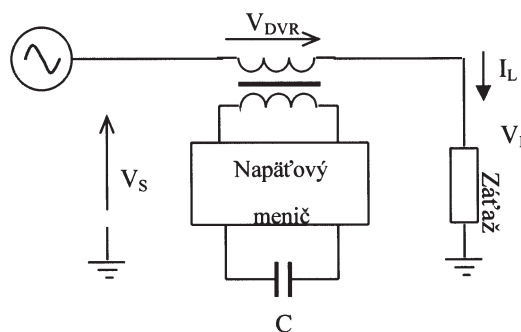
Zariadenia DVR a PASF slúžia na generovanie vektora napätia pri poklese, príp. výpadku napätia v sieti. Ich výkonová schéma



Obr.1 Napájanie lakovne kontinuálnych procesov (lakovanie, zváranie)

zapojenia je na obr. 2. Líšia sa spôsobom riadenia a režimom činnosti (PASF – trvale, DVR – horúca rezerva určitý čas).

Na korekciu poklesov napätia sa navrhlo niekoľko metód riadenia: metóda Pre-sag, In-Phase a najnovšia metóda Minimal Energy Control. Typ metódy pre DVR je určený v závislosti od druhu kritickej záťaže. Riadiace metódy musia akceptovať obmedzenia DVR, ktoré vychádzajú z jeho princípu činnosti, t. j. nominálne hodnoty meniča, transformátora a zásobníka energie. Ďalším obmedzením je minimalizácia činného výkonu dodávaného z DVR.



Obr.2 Napájanie záťaže s DVR

Kompenzačná metóda Pre-sag

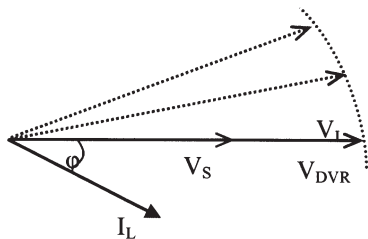
Väčšina nelineárnych záťaží, ako sú tyristorovo riadené záťaže, ktoré používajú fázový uhol napájacieho napätia ako referenčný údaj pre fázové riadenie, sú na zmeny fázového uhla citlivé. Na vyriešenie tohto problému táto technika kompenzuje rozdiel medzi napätiami pri poklese a pred poklesom tak, že obnoví okamihové hodnoty napätia na ten istý fázový uhol a veľkosť ako malo menovité napätie pred poklesom. Nevýhodou je obmedzená schopnosť zásobníka energie injektovať činný výkon.

Pri objavení sa poruchy na ostatných vedeniach napätie V_S poklesne a DVR injektuje sériové napätie V_{DVR} (ako rozdiel napätia záťaže a siete $V_L - V_S$) prostredníctvom väzobného transformátora.

Kompenzačná metóda In-phase

Pri tejto stratégii je kompenzačné napätie V_{DVR} vo fáze s napätím naľavo od DVR V_S bez ohľadu na prúd záťaže a na napätie pred poruchou. Fázorový diagram pre tento prípad je na obr. 3, kde I_L je prúd záťaže a φ je fázový posun prúdu a napätia záťaže. Veľkosť napätia V_{DVR} je taká, aby hodnota napätia V_L bola jednotková, 1 pu.

$$V_{DVR} = 1 - V_S \quad (1)$$



Obr.3 Kompenzačná metóda In-phase

Výhodou tejto metódy je, že veľkosť injektovaného napätia je minimálna. Preto je zdanlivý výkon DVR minimalizovaný pre daný prúd záťaže a pokles napätia. Ak je veľkosť napätia zdroja porušená, DVR generuje rovnaké napätie, ako je napätový pokles, vo fáze s napätím zdroja cez prispôbovací transformátor. Keďže je určitá zložka V_{DVR} vo fáze s prúdom záťaže I_L , DVR musí do siete dodať určité množstvo činnnej energie.

Energia prechádzajúca transformátorom počas poruchy napätia môže byť vypočítaná podľa (2) ako: (Δt – čas výpadku):

$$\Delta W_{DVR} = 3 \cdot (V_S - V_{SAG}) \cdot I_S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta t \quad (2)$$

Pri vybíjaní môže kondenzátor jednosmerného obvodu poskytnúť energiu podľa (3):

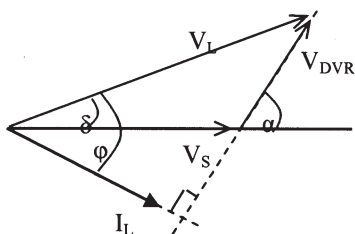
$$\Delta W_{DC} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{DCmax}^2 - V_{DCmin}^2) \quad (3)$$

Z princípu energetickej bilancie vyplýva nasledujúci výsledok (za predpokladu nulových strát v meniči):

$$\Delta t = \frac{C \cdot (V_{DCmax}^2 - V_{DCmin}^2)}{6 \cdot (V_S - V_{SAG}) \cdot I_S \cdot \cos \varphi} \quad (4)$$

Kompenzačná metóda Minimal Energy Control (MEC)

Ak je pre danú záťaž fázor napätia V_{DVR} kolmý na prúd záťaže I_L , potom na obnovenie napätia pomocou DVR netreba injektovať činný výkon [2], [3]. Obr. 4 ukazuje fázorový diagram pre stratégiu minimálnej energie.



Obr.4 Kompenzačná metóda MEC

V tomto prípade vypočítame uhly α a δ ako

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \quad (5)$$

$$\delta = \varphi - \cos^{-1} \frac{V_L \cdot \cos \varphi}{V_S} \quad (6)$$

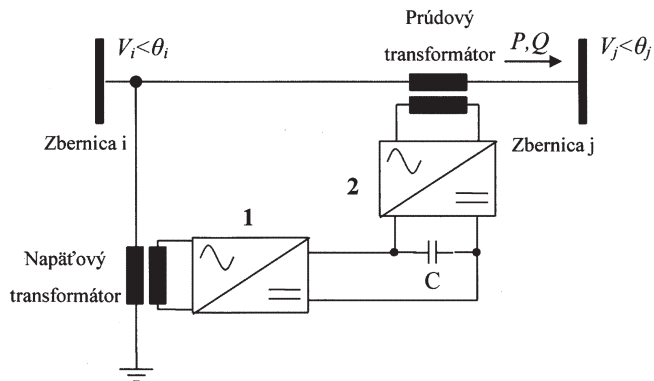
Ak parametre napájacieho napätia spĺňajú túto podmienku (7), potom prípustná hodnota δ je

$$V_L \cdot \cos \varphi < V_S \quad (7)$$

Nerovnosť (7) znamená, že úroveň poklesu napätia je iba plytká, preto je injektovaný činný výkon z DVR nulový a optimálna hodnota α sa získa z rovnice (5). Ak nie je nerovnosť (7) splnená, potom je úroveň poklesu napätia hlbšia a injektovaný činný výkon nie je nulový.

Zabezpečené napájanie prevádzky univerzálnym regulátorom tokov výkonu UPFC

UPFC zariadenie (obr. 5) je zložené z dvoch výkonových meničov, pripojených spoločným jednosmerným medziobvodom k sieti cez prevodové transformátory (paralelne a sériovo). Hlavnou úlohou



Obr.5 Schématické zapojenie UPFC

meniča 2 je riadiť výstupné napätie prenosovej sústavy a tým aj výstupný výkon. Základnou úlohou meniča 1 je udržiavať rovnováhu činného výkonu v jednosmernom medziobvode oboch meničov. Okrem toho môže dodávať a odoberať zo siete reaktívny výkon tým, že reguluje napätie na vstupných svorkách záťaže.

Výkonový regulátor UPFC môže teda riadiť súčasne činný a jalový výkon. Vo všeobecnosti má tri regulačné veličiny a môže byť prevádzkovaný v rôznych druhoch prevádzky.

Použitie UPS ako zdroja nepretržitého napájania citlivých spotrebičov

Inou možnosťou, ako zabezpečiť nepretržité napájanie citlivých spotrebičov, je použitie zdroja nepretržitého napájania UPS so zálohovou batériou, dimenzovanou na požadovanú dobu prekrytia výpadku siete. Celková schéma nepretržitého napájania je na obr. 6. Zdroj UPS môže pritom pracovať v štyroch základných režimoch činnosti:

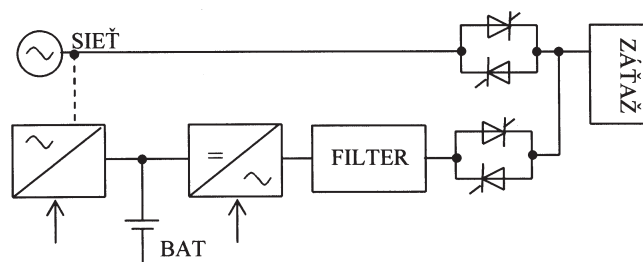
- studená rezerva (trvale vypnutý, do činnosti sa zapína až pri poruche siete),
- horúca rezerva (trvale beží naprázdno, pri výpadku siete sa zapne elektronickým spínačom),
- paralelná prevádzka so sieťou (s delením výkonu v pomere 1 : 1),
- trvalé napájanie záťaže cez UPS (sieť je odpojená elektronickým spínačom).

Najvýhodnejším režimom sa javí paralelná prevádzka zdroja UPS a siete, pričom každý z nich dodáva polovicu výkonu záťaže. Pri výpadku aj pri poklese napájania, príp. pri skrate v sieti UPS automaticky preberie plný výkon pri minimalizovaní zmien napätia počas prechodného stavu.

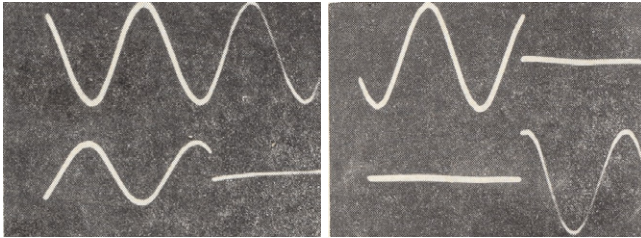
Určitou nevýhodou metódy je nižšia energetická účinnosť napájania, avšak stredná doba bezporuchovej prevádzky (nepriamo úmerná intenzite porúch zariadenia) sa zvýši rádovo za predpokladu, že porucha v jednej časti sa neprenesie do druhej (to zabezpečujú elektronické prepínače).

$$M = \frac{M_m \cdot M_s}{T_0} \quad (8)$$

kde M_m je stredný čas bezporuchovej prevádzky meniča,
 M_s – stredný čas bezporuchovej prevádzky siete,
 T_0 – čas opravy meniča.



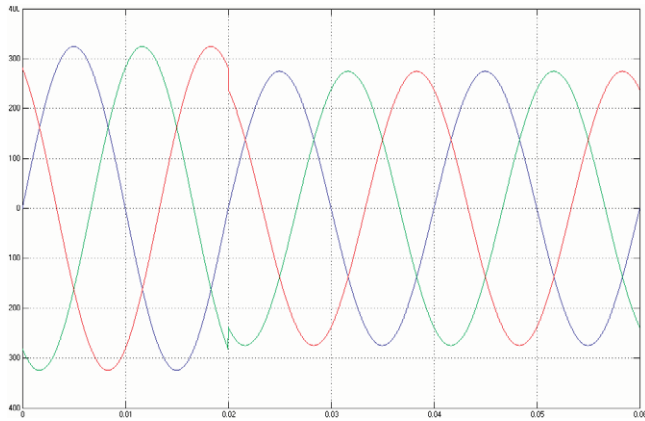
Obr.6 Schéma nepretržitého napájania



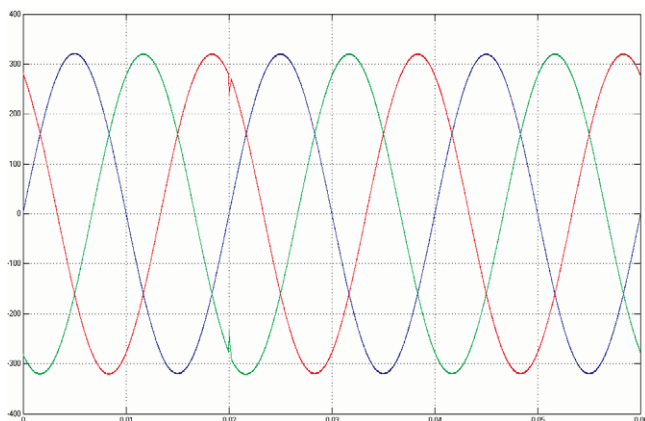
a) napätie na záťaži (hore),
na vstupe meniča (dole)

b) prúd spínača meniča (hore),
prúd pri prepnutí záťaže (dole)

Obr.7



Obr.8 Priebeh napätia siete



Obr.9 Priebeh napätia záťaže

Simulačné výsledky

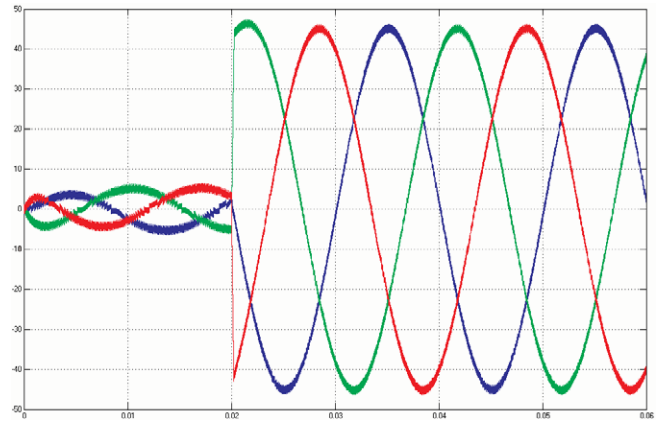
V prípade použitia DVR bol simulovaný pokles napätia o 50 V (15,3 %), v čase $t = 20$ ms (obr. 8). Na obr. 9 je napätie na záťaži a na obr. 10 napätie generované DVR. V simulácii sa nezohľadnili reálne spínacie časy spínacích prvkov.

Záver

Na kompenzovanie poklesov a výpadkov napätia v distribučných sústavách možno pri citlivej záťaži použiť rôzne typy zariadení spomínané v predchádzajúcich kapitolách.

V prípade dynamického reštaurátora napätia (DVR) sú prezentované rôzne stratégie riadenia na kompenzáciu poklesov napätia. Ďalej je uvedený nový koncept zabezpečenia napätia s využitím zariadenia UPFC. Vo všeobecnosti možno generovať vektor napätia DVR s ľubovoľným vektorom, a tak dodávať záťaži počas napätového poklesu alebo prerušenia potrebný činný, ako aj jalový výkon.

Výsledky vykonaných simulačných experimentov, a teda aj uvedené závery platia iba za predpokladu, že reakčný čas DVR je vzhľadom na dĺžku napätového poklesu, príp. čas prerušenia napätia zanedbateľný. Indikačný snímač s okamžitým vyhodnote-



Obr.10 priebeh napätia na DVR

ním komparačnej úrovne poklesu napätia je však ťažko realizovateľný. Ďalším vylepšeným riešením by bolo generovanie napätového vektora DVR v závislosti od fázového posunu záťažového prúdu pri jeho súčasnom priebežnom monitorovaní.

Nasadenie týchto zariadení je limitované kapacitou zásobníka energie, z ktorého sa dodáva energia pri výpadku alebo poklese napätia siete. Keďže UPS obsahujú akumulátorovú batériu, navrhujú sa ako zálohové zdroje pre dlhšie výpadky siete, rádovo minúty až hodiny. Naproti tomu zariadenia DVR a UPFC sa nachádzajú na VN strane a dodávaná energia je vysoká ($\sim CU^2$) a čas zaskoku (príp. kompenzácie napätia) je adekvátne malý, rádovo stovky milisekúnd.

Tento článok vznikol za podpory projektu VEGA 1/0178/03 – 15/603, štátneho programu VaV 2003 SP 51/028 09 00/028 09 05 – 2003 a medzinárodného výskumného projektu DAAD 3/2003.

Literatúra

- [1] STN EN 50160: Napätové charakteristiky elektrickej energie dodávanej verejnými rozvodnými sústavami. Slovenská technická norma, SÚTN, Bratislava, 1998.
- [2] ANDRÁS, D., SANTARIUS, P. et al.: Kvalita dodávanej elektrickej energie v sítích nízkeho napätia. Zborník VŠB-TU Ostrava (CZ) a Hungarian Cooper Promotion Centre, Budapešť (HU), 2001.
- [3] KIM, H.: Minimal Energy Control for a Dynamic Voltage Restorer. Zborník z medzinárodnej konferencie IEEE-PCC'02, Osaka (JP), apríl 2002, CD-ROM.
- [4] DOBRUCKÝ, B., ALTUS, J., ŠPÁNIK, P.: Synergické pôsobenie výkonovej elektroniky, elektrickej trakcie a elektroenergetiky. Komunikácie – Vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline, č. 2 – 3, 2001, s. 16 – 28.

Branislav Dobrucký
Róbert Šul
Pavol Špánik

Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra mechatroniky a elektroniky
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
Tel.: 041/513 16 02
Fax: 041/513 15 24
e-mail: dobrucky@fel.utc.sk
robert.sul@fel.utc.sk
spanik@fel.utc.sk