

VLIV REKUPERUJÍCÍCH VOZIDEL NA DVANÁCTIPULZNÍ TRAKČNÍ USMĚRŇOVAČ S PRORAŽENÝMI DIODAMI

Ladislav MLYNÁŘÍK, Radovan DOLEČEK, Stanislav GREGORA

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

1. Úvod

Článek se zabývá situací, jež může nastat po průrazu dvojice diod ve dvanáctipulzním usměrňovači napájecí stanice 3kV DC, jsou-li v napájeném úseku přítomna rekuperující vozidla. Pro účely analýzy byl sestaven počítačový model napájecího řetězce v době rekuperace. Cílem výzkumu je analyzovat ohrožené komponenty napájecího řetězce v případě rekuperace do průrazem porušeného usměrňovače.

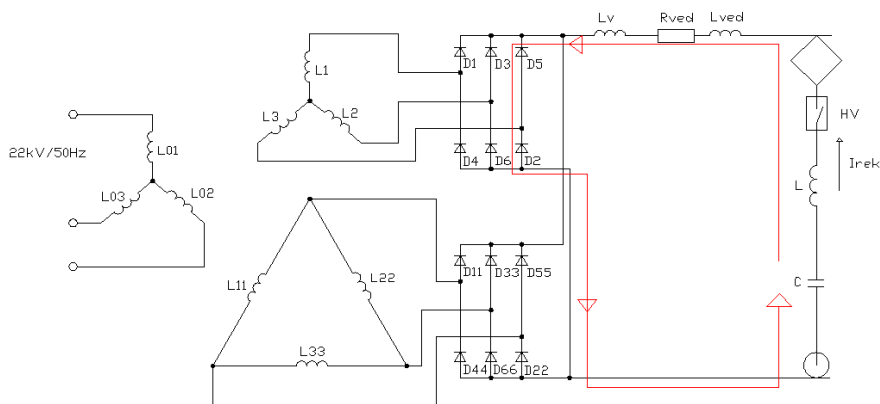
2. Rekuperace energie zpět do trolejového vedení

Ve stejnosměrné trakční napájecí soustavě platí pravidlo, že vyrobená energie musí být ve stejný okamžik spotřebována jinými spotřebiči a není možné ji vracet zpět do veřejné distribuční sítě. Tímto odběrem může být prakticky pouze jiné činné hnací vozidlo. Odlišná situace může nastat v případě průrazu dvou diod opačné polaritě v jednom z můstků. V takové situaci dojde ke zkratu trakčního vedení a tím i ke zkratu rekuperujícího vozidla. Právě uvedený zkrat vytváří rekuperujícímu vozidlu potřebný odběr.

Na obrázku 1 je uveden příklad takového stavu. Došlo k průrazu diod D5 a D2, čímž vznikl zkrat zdroje, který je v tomto schématu reprezentován kondenzátorem C stejnosměrného meziobvodu rekuperujícího vozidla. V případě, že by došlo k průrazu jiných diod, například D33 a D22 (případně D1 a D6), je zkrat rekuperujícího vozidla

omezen nejen parametry trakčního vedení, ale také sekundárním vinutím usměrňovačového transformátoru.

V případě, že zpět do napájecí stanice poteče proud menší než je nastavená spoušť rychlovyvínače, vyvínač tento proud nevyvíne. V takovém případě je ohrožen odpojovač řazený mezi sběrnou stejnosměrného napětí a usměrňovačovou jednotku. Pouze u některých nejnověji postavených napájecích stanic je nainstalována ochrana indikující směr toku proudu do napájecí stanice, která následně vyvíne spoušť rychlovyvínače.



Obr. 1 Směr toku recuperovaného proudu usměrňovačem s porušenými diodami D5 a D2

3. Odvození náhradního schématu a popis laboratorního transformátoru

Za účelem provádění jednotlivých simulací bylo odvozeno náhradní schéma napájecího řetězce. Jedná se o simulace vlivu recuperujícího vozidla na usměrňovač s proraženými polovodičovými diodami a jeho transformátor.

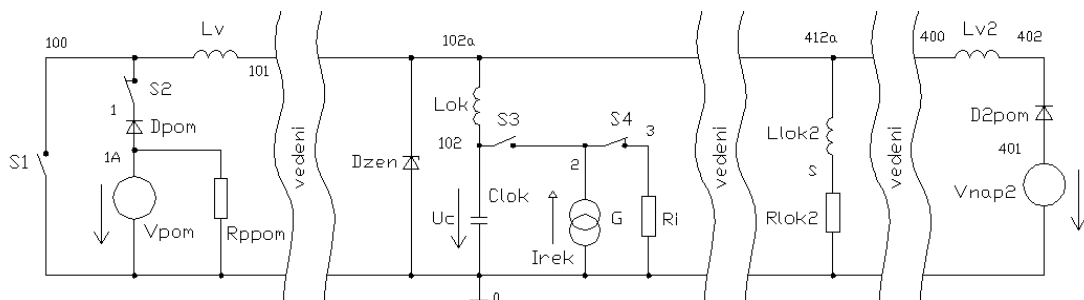
Odvození náhradního obvodu v době recuperace

Na obrázku 1 byly naznačeny možnosti průchodu recuperovaného proudu přes usměrňovač, případně sekundární vinutí transformátoru, v případě průrazu konkrétních diod (např. D1 a D6). Na obrázku 2 je uvedeno náhradní schéma umožňující simulovat poměry v takových případech.

Ve střední části schématu je modelováno recuperující vozidlo reprezentované především kondenzátorem meziobvodu Cl_{ok}. Přesáhne-li napětí tohoto kondenzátoru aktuální hodnotu trolejového napětí, dochází k vlastní recuperaci, tedy toku el. proudu z vozidla do trakčního vedení. Tento proud dodává v uvedeném náhradním schématu napětěově závislý zdroj proudu G. Zdroj G dodává proud o hodnotě $Prek/Uc$ [A].

Zenerova dioda Dzener má nastaveno Zenerovo napětí na hodnotu 3600V a simuluje tak schopnost vozidla regulovat napětí na svém sběrači právě na této hodnotě.

Vlastní modelovanou napájecí stanicí v poruše popisuje levá část uvedeného schématu. V první fázi simulace plní napájecí stanice stejnou funkci jako napájecí stanice v pravé části schématu. V okamžiku simulovaného průrazu diod dojde pomocí spínače S1 ke zkratu rekuperujícího vozidla.



Obr. 2 Náhradní schéma pro simulace poruch v době rekuperace

Laboratorní transformátor s dvojicí sekundárních vinutí

K měření vlastností stejnosměrného proudu tekoucího sekundárním vinutím transformátoru byl použit třífázový transformátor s dvojicí sekundárních vinutí. Primární vinutí je zapojeno do hvězdy. Převodový poměr transformátoru je 1:1. Hodinový úhel laboratorního transformátoru odpovídá skutečnému provedení transformátorů s dvojicí sekundárních vinutí typu RESIBLOC a je Yyn0d1. Výkon transformátoru je 5000VA.

Pro transformátor napájející dvanáctipulzní usměrňovač jsou nezbytnými podmínkami stejné rozptylové indukčnosti obou sekcí transformátoru a také stejná sdružená napětí na výstupu obou sekundárních vinutí. Experimentálním měřením byla zjištěna stejná sdružená napětí obou sekundárních vinutí naprázdno a rozdílné rozptylové indukčnosti obou sekcí transformátoru. Uvedený jev bohužel nebylo možné na stávajícím transformátoru nijak odstranit.

4. Analýza poměrů na porušeném usměrňovači v době rekuperace

V momentě průrazu konkrétní dvojice diod (podle příkladu na obr. 1) dochází ke zkratu stejnosměrné strany usměrňovače. V případě, že je v napájeném úseku rekuperující vozidlo, bude zkratován i tento dodatečný zdroj a jeho proud zvyšuje zatížení komponent napájecího řetězce.

Stanovení průběhu proudu tekoucího zpět do napájecí stanice

Pomocí simulací náhradního schématu z obrázku 2 byly analyzovány průběhy proudů, které mohou téci v případě průrazu konkrétních dvojic diod zpět do napájecí stanice.

Jako příklad provedených simulací byla vybrána situace modelující dvě těsně se míjející vozidla, kdy první například brzdí k místu zastavení a druhé se z tohoto místa

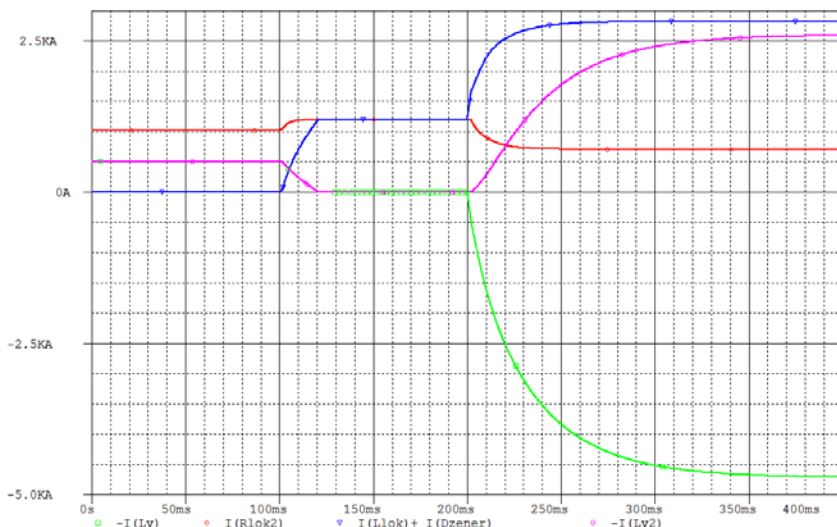
rozjíždí. Obě vozidla se nacházejí v polovině meziměřínské vzdálenosti která byla pro příklad zvolena 20km. Rekuperující vozidlo dodává výkon 6MW.

V první fázi simulace je druhé vozidlo napájeno výhradně napájecími stanicemi, z nichž každá dodává polovinu jeho proudu (vozidlo je v polovině vzdálenosti).

V čase 100ms začne první vozidlo rekuperovat, čímž dojde ke zvýšení napětí v troleji na 3600V. Rekuperovaný proud postupně pokryje veškerý odběr druhého vozidla. Proud dodávaný rekuperujícím vozidlem je dostačující pro krytí všech odběrů a proto je proud napájecích stanic nulový.

V čase 200ms dojde k simulovanému průrazu diod D2 a D5 v usměrňovači první napájecí stanice. Zkrat způsobí pokles napětí na sběrači vozidla a vozidlo na tuto změnu zareaguje zvýšením proudu dodávaného do troleje, čímž udržuje na svém sběrači určitou hodnotu napětí. Protože se jedná o napětí nižší než je napětí druhé měřírny, začne tato měřírna společně s rekuperujícím vozidlem dodávat proud do druhého vozidla a zároveň do zkratu představovaného diodami D2 a D5 v poškozené stanici. Tato fáze bude trvat až do vypnutí stejnosměrného rychlo vypínače v napájecí stanici, ve které došlo k poruše. Pomocí datové vazby rychlo vypínačů vypne příslušný vypínač i v sousední měřírně.

V případě nastavení stejnosměrného rychlo vypínače nad hodnotu ustáleného zkratového proudu bude tato fáze trvat až do odpojení odpojovače řazeného mezi poškozený usměrňovač a sběrnou stejnosměrného napětí. Poteče-li tímto odpojovačem v době manipulace rekuperovaný proud, může dojít k jeho poškození.



Obr. 3 Teoretický průběh proudu tekoucího zpět do napájecí stanice

- maximální teoretický proud tekoucí zpět do napájecí stanice: 4,70kA
- napětí na sběrači rekuperujícího vozidla: 2,12kV

Dále bylo provedeno několik simulací vzájemně se lišících pouze prostorovou konfigurací vozidel a hodnotami rekuperovaných výkonů.

Vozidlo rekuperující 2MW v polovině napájeného úseku

Nižší rekuperovaný proud způsobí, že vozidlo neudrží na svém sběrači hodnotu napětí nad 2kV. V tomto případě může vozidlo nestandardní situaci rozpoznat a rekuperaci ukončit.

- maximální teoretický proud tekoucí zpět do napájecí stanice: 3,92kA
- napětí na sběrači rekuperujícího vozidla: 1,77kV

Proudové poměry za situace, kdy zkratový proud dodává pouze druhá TNS

- maximální teoretický proud tekoucí zpět do napájecí stanice: 3,65kA

Vozidlo rekuperující 6MW umístěné 3 km od porušené měřírny

- maximální teoretický proud tekoucí zpět do napájecí stanice: 8,01kA
- napětí na sběrači rekuperujícího vozidla: 1,08kV

Vozidlo rekuperující 6MW v těsné blízkosti porušené měřírny

- napětí na sběrači rekuperujícího vozidla: 0,15kV

Vozidlo rekuperující 2MW v těsné blízkosti porušené měřírny

- napětí na sběrači rekuperujícího vozidla: 0,09kV

Vozidlo rekuperující 6MW v polovině 20km dlouhého napájeného úseku, bez dalšího odběru

- maximální teoretický proud tekoucí zpět do napájecí stanice: 4,98kA
- napětí na sběrači rekuperujícího vozidla: 2,24kV

Vozidlo rekuperující 6MW v blízkosti porušené napájecí stanice, bez dalšího odběru

- napětí na sběrači rekuperujícího vozidla: 0,15kV

5. Analýza indukčnosti mezi dvěma sekundárními fázemi transformátoru

V případě toku rekuperovaného proudu přes sekundární vinutí transformátoru je zřejmé, že indukčnost působící mezi dvěma fázemi bude nárůst stejnosměrného proudu, vstupujícího do napájecí stanice s poškozeným usměrňovačem, brzdit.

Pro ověření průběhů rekuperovaného proudu tekoucího přes sekundární vinutí transformátoru byl proveden teoretický rozbor vztahů mezi indukčnostmi jednotlivých vinutí trakčního transformátoru. Bez znalosti podrobných parametrů tohoto transformátoru však není možné analýzu poruchových stavů dokončit. Proto je průchod rekuperovaného proudu sekundárním vinutím transformátoru analyzován experimentálně na již popsaném laboratorním transformátoru s dvojicí sekundárních vinutí, zapojených do D a Y.

Z výsledků je následně usuzováno na rychlost nárůstu zkratového proudu a velikost indukčnosti mezi dvěma sekundárními fázemi u reálného trakčního transformátoru při poruše usměrňovače a současné dodávce stejnosměrné energie přes poškozený usměrňovač.

Měření naprázdno byly zjištěny indukčnosti 5,27H u dvojice vinutí zapojeného do Y a 5,79H u dvojice vinutí zapojeného do D.

K ověření výsledků hodnoty indukčnosti získané z měření laboratorního transformátoru naprázdno mezi dvěma sekundárními fázemi bylo provedeno měření časové odezvy proudu tekoucího dvojicí sekundárních vinutí transformátoru na skok napětí.

V měření byla sledována doba, za kterou stejnosměrný proud dosáhl 63% své ustálené hodnoty. Změřená doba je 0,5s. V případě, že by se jednalo o soustavu 1. řádu, bylo by možno na základě poměru L/R určit hodnotu indukčnosti v obvodu označenou jako Lt. R je hodnota odporu dvojice vinutí podle tab. 3. Podobné měření bylo provedeno při napájení sekundárního vinutí transformátoru zapojeného do D. V tomto případě odečtená doba činila 0,7s.

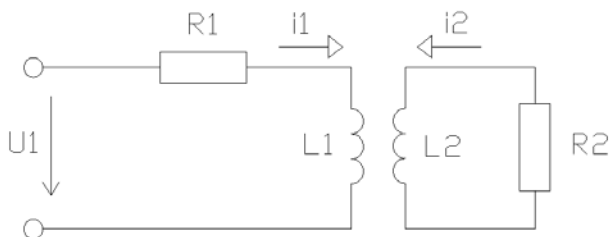
Měření časové odezvy proudu tekoucího dvojicí sekundárních vinutí transformátoru na skok napětí byly zjištěny indukčnosti 0,60H u dvojice vinutí zapojeného do Y a 0,91H u dvojice vinutí zapojeného do D. Porovnáním získaných výsledků s indukčností zjištěnou měření naprázdno je vidět rozpor naměřených hodnot.

Teoretický rozbor průběhu proudu mezi dvěma fázemi sekundárního vinutí transformátoru v případě napájení stejnosměrným proudem

Teoreticky je možné tuto situaci popsat obvodem na obrázku 4. Tento obvod popisuje situaci reálného transformátoru při napájení stejnosměrným napětím. Sekundární obvod tvořený prvky L2 a R2 představuje obvod modelující ztráty v magnetickém obvodu transformátoru. Rozdílnost hodnot indukčností zjištěných střídavým měřením naprázdno a zjištěných na základě proudové odezvy na skok napětí

se projevuje u zatíženého transformátoru, kdy se uplatňuje vzájemná magnetická vazba primárního a sekundárního obvodu.

Odvozený vztah pro průběh proudu byl následně číselně vyřešen dosazením hodnot odpovídajících parametrům laboratorního transformátoru.



Obr. 4 náhradní schéma pro teoretické odvození časové odezvy proudu na skok napětí U_1

Pro obvod na obrázku 6, modelující magnetickou vazbu primárního a sekundárního vinutí transformátoru resp. magnetickou vazbu mezi primárním vinutím transformátoru a fiktivním sekundárním vinutím modelujícím vliv vířivých proudů v magnetickém obvodu, platí

$$U_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad (1)$$

$$0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \quad (2)$$

kde

$$L_1 = L_h + L_{1\sigma}, \quad (3)$$

$$L_2 = L_h + L_{2\sigma}, \quad (4)$$

$$M = L_h. \quad (5)$$

Po derivaci rovnic 1 a 2 dostáváme

$$0 = R_1 \frac{di_1}{dt} + L_1 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + M \frac{d^2 i_2}{dt^2}, \quad (6)$$

$$0 = R_2 \frac{di_2}{dt} + L_2 \frac{d^2 i_2}{dt^2} + M \frac{d^2 i_1}{dt^2}. \quad (7)$$

Lineární diferenciální rovnice 2. řádu s konstantními koeficienty má tvar

$$U_1 = R_1 i_1 + \left(L_1 + \frac{L_2 R_1}{R_2} \right) \frac{di_1}{dt} + \left(\frac{L_1 L_2}{R_2} - \frac{M^2}{R_2} \right) \frac{d^2 i_1}{dt^2}. \quad (8)$$

Řešením její charakteristické rovnice získáváme pro laboratorní transformátor číselné hodnoty kořenů charakteristické rovnice λ_1 a λ_2 . $\lambda_1 = -0,095$ a $\lambda_2 = -14,34$.

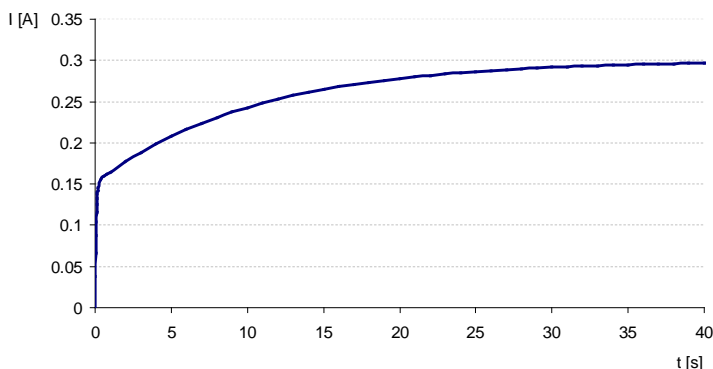
Za předpokladu reálných různých kořenů charakteristické rovnice dostáváme obecné řešení diferenciální rovnice ve tvaru

$$i_{10} = K_1 e^{\lambda_1 t} + K_2 e^{\lambda_2 t}. \quad (9)$$

Po určení koeficientů K_1 a K_2 dostáváme vztah pro průběh proudu

$$i_1(t) = -0,149 e^{-0,095 t} - 0,151 e^{-14,34 t} + 0,3. \quad (10)$$

Vykreslením vyřešené rovnice 10 je získán časový průběh odezvy proudu na skok napájecího napětí.



Obr. 5 teoretický průběh proudu podle rovnice 10

Z odvozených vztahů je patrná závislost této časové odezvy na hodnotě odporu R_2 na obrázku 4. Tento odpor představuje u reálného transformátoru naprázdno vliv ztrát, zejména vířivými proudy, v magnetickém obvodu transformátoru. Výše provedené výpočty byly dále ověřeny měřením časové odezvy proudu na skok napájecího napětí na laboratorním transformátoru a simulací náhradního schématu, jež vychází ze zapojení na obrázku 4.

Jak bylo dokázáno předchozími výpočty, hlavní indukčnosti mezi dvěma fázemi nevypovídají přesně o rychlosti nárůstu stejnosměrného zkratového proudu sekundárním vinutím transformátoru. Nejsou v nich zohledněny ztráty v magnetickém obvodu transformátoru.

Rychlost nárůstu zkratového proudu v případě rekuperace bude vyšší. Protože reálný trakční transformátor je zatížen ztrátami v magnetickém obvodu ($\cos\varphi$ naprázdno je 0,73), bude průběh nárůstu zkratového proudu v době rekuperace odpovídat spíše křivce na obrázku 5. V první fázi se bude jednat o velmi rychlý děj omezený prakticky jen rozptylovou indukčností transformátoru. Rekuperovaný (zpětný) proud tak ještě zvýší proudové namáhání transformátoru v napájecí stanici.

6. Závěr

V první části tohoto příspěvku byly ověřeny hodnoty zkratových proudů tekoucích napájecím řetězcem. Samostatně byla analyzována situace, kdy zkratový stejnosměrný

proud teče přes sekundární vinutí usměrňovačového transformátoru. Indukčnosti tohoto transformátoru zpomalí nárůst stejnosměrného zkratového proudu. Avšak v první fázi nárůstu zkratového proudu se projevují především rozptylové indukčnosti transformátoru, které dovolují rychlý nárůst zkratového proudu. Celý interval nárůstu zkratového proudu se u reálného transformátoru dále zkracuje vlivem přesycení magnetického obvodu při připojení na stejnosměrný zdroj.

Z teorie obvodů je možné usuzovat, že nejnepříznivější situace nastává v případě rekuperace v těsné blízkosti napájecí stanice, kdy není zkratový proud omezen odpory trakčního vedení. Simulace ovšem ukazují, že při umístění rekuperujícího vozidla do blízkosti napájecí stanice dochází vlivem blízkého zkratu k poklesu napětí na sběrači pod hranici 2kV. Vozidlo tak má dobrou možnost nestandardní situaci rozpoznat a rekuperaci ukončit.

Za potenciálně nejrizikovější je možné považovat situace, kdy je rekuperující vozidlo dostatečně blízko, aby protlačilo vedením vysoký proud, ale zároveň dostatečně daleko na to, aby napětí na jeho sběrači nepokleslo pod 2kV.

V případě, že zdroje ve stejnosměrném trakčním vedení protlačí do napájecí stanice proud větší, než je nastavená spoušť rychlovypínače, dojde k jeho vypnutí. Hodnoty proudu tak vlivem indukčností v obvodu nedosáhnou svého ustáleného maxima.

V případě vybrané konfigurace rozmístění vozidel po trati nebo při rekuperaci nižších výkonů nemusí proud tekoucí zpět do napájecí stanice stačit k vybavení spouště rychlovypínače u všech napájecích stanic. Zkratový rekuperovaný proud v popsaném případě poteče přes proražené diody a v případě jejich konkrétní kombinace zatěžuje příslušnou sekci (Y, D) sekundárního vinutí transformátoru.

Tato situace je nebezpečná zejména pro strojový odpojovač řazený mezi sběrnou stejnosměrného napětí 3kV a poškozený usměrňovač. Tento odpojovač začne odpojovat ihned po skutečném vypnutí primárního vypínače transformátoru (reagujícího na průraz diod v usměrňovači). Proto je vhodné vždy doplnit usměrňovač ochranou vyhodnocující směr toku proudu na stejnosměrné straně. Tato ochrana se již dnes instaluje u některých nejnověji budovaných napájecích stanic. Její nasazení dává jistotu odstavení poškozené usměrňovačové jednotky od stejnosměrného trolejového vedení.

Situaci by komplikovala pouze vozidla, která by rekuperovala i v případě velmi nízkých hodnot napětí na svém sběrači. Jak již bylo uvedeno, taková situace by mohla nastat například v době rekuperace těsně u napájecí stanice, kdy by proud tekoucí zpět do napájecí stanice mohl dosahovat i během desítek milisekund velmi vysokých hodnot. Z hlediska ochrany napájecí stanice před tokem nebezpečného proudu zpět do TNS je proto vhodné rekuperaci při nízkých hodnotách trolejového napětí vždy přerušit.

Předloženo: 30. 5. 2013

Literatura

- [1] HLAVA, Karel. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. 124 s. ISBN 80-7194-637-0.
- [2] ČERNÝ, Ondřej; DOLEČEK, Radovan. *Úvod do programu PSPICE*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. 100 s. ISBN 978-80-7395-115-3.
- [3] MLYNAŘÍK, Ladislav. *EMC trakční měnirny vůči napájecí síti při paralelním provozu trakčních usměrňovačů*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. 70 s. Diplomová práce.
- [4] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk; GRIC, Rudolf; PAVELKA, Jiří. *Výkonová elektronika I*. Praha: ČVUT, 1996. 196 s. ISBN 80-01-00723-5.
- [5] IBL, Jaroslav. *Průmyslová elektronika II. část: Rtuťové usměrňovače*. Praha: SNTL, 1955. 196 s.
- [6] LANÁKOVÁ, Gabriela; ŠPÁNIK, Pavol; POSPÍŠIL, Milan. *Napájanie elektrických dráh: Návodý na cvičenia*. Žilina: Žilinská univerzita, 1997. 130 s. ISBN 80-7100-463-4.
- [7] *Calculating of peak value and steady-state value of short-circuit current at external short-circuit on bridge rectifier with silicon diodes*. ABB Poland, 2006.
- [8] HELLER, Bedřich. *Návrh transformátorů pro usměrňovače*. *Elektrotechnický obzor*. 1954, 1, s. 3-10.
- [9] HELLER, Bedřich. *Stanovení rozptylu transformátorů usměrňovačů s ohledem na komutaci diod*. *Elektrotechnický obzor*. 1954, 3, s. 119-123.
- [10] HERSKIND, C.C.; KELLOGG, H.L. *Rectifier fault currents*. *Transactions AIEE*. 1945, 3, s. 145-150.
- [11] HERSKIND, C. C.; KELLOGG, H. L.; SCHMIDT, A. *Rectifier fault currents - II*. *Transactions AIEE*. 1949, s. 243-252.
- [12] HLAVA, Karel. *Parametry odběru elektrické energie dvanáctipulzním trakčním usměrňovačem v závislosti na jeho zatížení*. *Vědeckotechnický sborník ČD č.14* [online]. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 2002 [cit. 2010-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/vts14.html>>. ISSN 1214-9047.
- [13] MLYNAŘÍK, Ladislav. *Model dvanáctipulzního usměrňovače*. *Vědeckotechnický sborník ČD č.29* [online]. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 2010 [cit. 2010-07-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/vts29.html>>. ISSN 1214-9047.
- [14] Semikron [online]. 2009 [cit. 2010-07-13]. Semikron. Dostupné z WWW: <http://www.semikron.com/internet/webcms/online/asim/07891105_DS.pdf>.
- [15] *Nastavovanie, prevádzka a údržba reléových ochrán trakčného napájacieho obvodu SR34 (E)*, Služobná rukoväť. NADAS Praha.
- [16] NOVÁK, Jaroslav. *Návrh pulsního měniče s RCT tyristory*. Praha: ČVUT, 1989. Diplomová práce.
- [17] *Návod k údržbě a obsluze diodového měniče ve skříňovém provedení*. Elektrizace železnic Praha a.s., Praha, 2003.
- [18] BAŠTA, Jan; CHLÁDEK, Jaroslav; MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1968.

- [19] DUCHOŇ, M.; IBL, J.; KŘIVÁNEK, J. *Měrníky ČSD na 3000 V, ČSD - Instruktaže o zařízeních hlavních elektrických drah*. Praha: DN, 1954.
- [20] DOLEČEK, Radovan. *Napájení elektrických drah*. Studijní opora. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2012.
- [21] DOLEČEK, Radovan. Simulace přechodných stavů při zkratu. *Vědeckotechnický sborník Českých drah č.27*. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 2009. s. 1-15. ISSN: 1211-2321.
- [22] MIKULEC, Milan. *Teorie obvodů - přednášky*. Praha: ČVUT, 1984. 215 stran.
- [23] HLÁVKA, Jan. *Přechodné jevy v elektrických obvodech*. Praha: SNTL, 1959. 1.vydání. 188 stran.

Summary

FAULT STATES OF THE TWELVE-PULSE RECTIFIER DURING THE RECUPERATION

Ladislav MLYNÁŘÍK, Radovan DOLEČEK, Stanislav GREGORA

The paper deals with the fault states of twelve-pulse rectifier in traction substation of 3 kV DC traction system used at railways in the Czech Republic. The situation at diode breakdown of rectifier and at the same time recuperative traction vehicles in power supply section. The vehicle with recuperation can increase stress of elements in power supply system under certain conditions during fault states of rectifier. The simulation computer model was created for analysis of current waveforms in trolley line at this situation. The all simulations were done by program PSpice. The main goal is to analyze the endanger elements of power supply system and bring the recommendation for increasing of reliability of this mentioned power supply system.

In the first part of this paper, the values of short-circuit currents flowing through 3 kV DC traction system were numerically simulated. Independently the situation, when the short-circuit DC current flowing through the secondary winding of the transformer, was analyzed. The inductances of this transformer slow down the rise of DC short-circuit current. However, in the first stage of the rise of this DC short-circuit current, the leakage inductances of the transformer which allow a rapid rise of this current, become evident. The whole interval of rise of the short-circuit current at the real transformer is further reduced by the effect of oversaturation of the magnetic circuit at connection to the DC source. It is possible to conclude by the theory of the circuits that the worst situation is in the case of vehicle with recuperation very close to the traction substation when the short-circuit current is not limited by the resistors of the traction line. The simulations show, the voltage drop on the pantograph below 2 kV occurs by this close short-circuit. The vehicle has a good opportunity to recognize this non-standard situation and stop the recuperation. Potentially the most hazard situations can be considered, when vehicle with recuperation is close enough to pass through the catenary the high current, but far enough that the voltage on the pantograph does not fall below 2 kV. If the DC source in the contact line passes through the higher current to the traction substation than the set of high-speed circuit breaker, it will be turned off this circuit breaker. The current values by the effect of the inductances in the circuit reach their steady maximum. This situation is dangerous especially for the machine isolator (circuit breaker) located between 3 kV DC bus and the damaged rectifier. The circuit breaker starts to disconnect immediately after the switch off of the primary switch of the transformer (responding to diode breakdown in the rectifier). Therefore, it is always appropriate to add the protection to the rectifier evaluating the direction of the DC current flow. This protection is already installed in some built traction substations. Usage of this protection makes sure disconnection of the damaged rectifier unit from the catenary. The only vehicles, that would recuperative even if very low value of voltage at the pantograph, could complicate this situation (i.e. the situation of recuperation close the traction substation when the current flowing back to the traction substation could be up to tens of milliseconds with very high

values). The recuperation at the low catenary voltage is always suitable interrupt from viewpoint of protection of traction substation from dangerous current flow back to this traction substation.

Zusammenfassung

DER EINFLUSS DER DIODENBESCHÄDIGUNG IN DEM ZWÖLF – PULS - GLEICHRICHTER AUF DIE FUNKTION DES EINSPEISESYSTEMS 3KVDC IN DER DAUER DER FAHRZEUGGENERATORBREMSE

Ladislav MLYNAŘÍK, Radovan DOLEČEK, Stanislav GREGORA

Der Artikel beschreibt die Diodenbeschädigungen in dem Zwölf – Puls – Gleichrichter in der Eisenbahneinspeisestation 3kVDC in der Tschechische Republik. Die Autoren forschen die Situationen bei den Diodenbeschädigungen in dem Gleichrichter und bei der gleichzeitigen Fahrzeuggeneratorbremsung. Die Fahrzeuge erhöhen die Belastung der Komponenten in dem Einspeisesystem in der Dauer der Fahrzeuggeneratorbremse. Das Computermodell ist gelöst. Dieses Modell rechnet die Verläufe der Ströme in der Fahrdrathleitung. Die Ziele der Forschung sind die Analyse der Komponenten des Einspeisesystems und die Bestimmung der Empfehlung für die Erhöhung der Verlässlichkeit in dem Einspeisesystem.