

Jiří Šimánek¹, Vladimír Kudyn², Luboš Krátký³

Bezpečná funkce pevných trakčních zařízení při rekuperaci elektrických hnacích vozidel

Klíčová slova: *rekuperace, koordinace ochran, trakční vedení, elektrická hnací vozidla, technické specifikace pro interoperabilitu*

Úvod

Moderní kolejová vozidla závislé trakce jsou v současnosti již standardně vybavována rekuperační elektrodynamickou brzdou. O výhodnosti rekuperace při brzdění bylo již zpracováno velké množství článků, které jednoznačně potvrzují její ekonomický přínos. Pokud si ovšem uvědomíme, že rekuperující vozidlo představuje zdroj proudu nezanedbatelného výkonu, je nabíledni, že takovéto vozidlo bude mít zřejmě významný vliv i na vlastní trakční síť. Tímto významným vlivem je zejména ovlivnění funkce ochran trakčních napájecích a spínacích stanic (dále jen TNS a SpS). Tento příspěvek si klade za cíl seznámit odbornou veřejnost s riziky spojenými s jinak nepochybně přínosnou rekuperací.

Na síti SŽDC je rekuperace povolena na soustavě DC 3 kV pokynem generálního ředitele SŽDC č. 11/2009. Rekuperace je však povolena podmíněně pouze těm vozidlům, která splňují požadovaná ustanovení evropských norem. Na soustavě AC 25 kV / 50 Hz je pokynem generálního ředitele SŽDC č. 14/2008 povolen zkušební provoz rekuperace na vybraných traťových úsecích. Cílovým stavem je vytvoření takových podmínek v síti SŽDC, aby se rekuperace stala běžným provozním stavem pro všechna hnací vozidla splňující požadované podmínky.

Legislativa

Podmínky rekuperace jsou dány především normami ČSN EN 50388 a ČSN EN 50163 ed. 2, které budou zmíněny dále. Obě normy jsou závazné jednak z pohledu Technických specifikací pro interoperabilitu, subsystému Energy pro vysokorychlostní i konvenční tratě (TSI ENE HS i CR) a v případě ČSN EN 50163 ed.2 taktéž i ze stavebního a technického řádu drah (177/1995 Sb.).

¹ Ing. Jiří Šimánek, Ph.D., 1980, obor Dopravní infrastruktura – Elektrická zařízení v dopravě, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, systémový specialista pro problematiku dispečerské řídicí techniky, zpětné trakční cesty a rekuperace na odboru automatizace a elektrotechniky generálního ředitelství SŽDC, státní organizace.

² Ing. Vladimír Kudyn, Ph.D. 1976, Dopravní infrastruktura – Elektrická zařízení v dopravě, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, vedoucí oddělení elektrotechniky na odboru automatizace a elektrotechniky generálního ředitelství SŽDC, státní organizace.

³ Ing. Luboš Krátký, 1979, obor komerční elektrotechnika, fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni, vedoucí skupiny napájecích systémů na odboru automatizace a elektrotechniky generálního ředitelství SŽDC, státní organizace.

Norma ČSN EN 50388 uvádí pro hnací vozidla používající rekuperaci podmínky v čl. 12.1.1:

„Vlaky nesmí dále používat svoje rekuperační brzdy v případě, že:

- *dojde ke ztrátě napájecího napětí nebo ke zkratu mezi trakčním vedením a kolejnicí / zemí na stejném úseku napájeném z trakční napájecí stanice,*
- *trakční vedení neabsorbuje energii,*
- *síťové napětí je vyšší než U_{max2} (viz EN 50163, 4.1).*

Pokud není zajištěna absorpce vrácené energie jinými spotřebiteli, musí být u drážních vozidel použity jiné brzdové systémy“.

Vedle toho stanovuje norma ČSN EN 50163 ed.2 maximální napěťové úrovně pro rekuperující vozidla (hodnota U_{max2}):

DC 3 kV	3 900 V *)
AC 25 kV	29 kV

*) tato hodnota je pokynem č. 11/2009 pro rekuperující vozidlo na síti SŽDC omezena na úroveň 3 600 V.

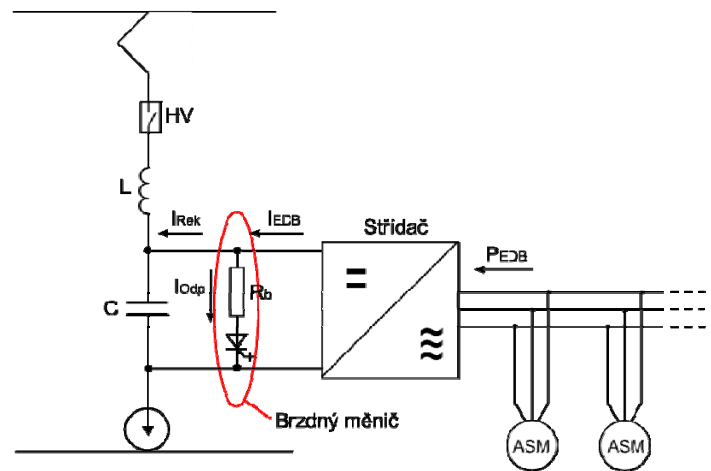
Z uvedených požadavků je nejzávažnější požadavek na ukončení rekuperace při vzniku zkratu. Je zřejmé, že pokud vozidlo ovlivní funkčnost ochrany svou rekuperací, nemusí dojít k jejich včasnému zaúčinkování a v důsledku toho k překročení požadovaných dotykových napětí¹ v místě zkratu. Je pochopitelné, že prodlužování doby zkratu není v žádném případě žádoucí. Vzhledem k principiálně odlišnému systému ochrany na DC a AC soustavě, je tato problematika analyzována v kapitolách jednotlivých soustav.

Princip funkce rekuperační elektrodynamické brzdy

Vozidlo na soustavě DC 3 kV

Principiální schéma moderního vozidla s asynchronními motory na soustavě DC 3 kV lze vidět na Obr. 1. Asynchronní trakční motory jsou napájeny ze střídače (příp. i více střídačů), který vytváří třífázové napětí proměnné efektivní hodnoty a frekvence. Tento střídač je napájen ze stejnosměrného meziobvodu tvořeného filtračním kondenzátorem. Tento kondenzátor má za úkol vytvářet pro střídač napěťový zdroj (zde myšleno hlavně jako zdroj s minimální indukčností), který je nezbytný pro správnou funkci střídače. Stejnosměrný meziobvod je napájen z troleje přes sběrač, hlavní vypínač a filtrační tlumivku, která zabraňuje šíření rušivých proudů vznikajících funkcí střídače do trakční sítě. Do stejnosměrného meziobvodu je dále zapojen takzvaný brzdový měnič, což je ve své podstatě stejnosměrný pulsní měnič, který připojuje brzdový odpor k meziobvodu.

¹ povolené hodnoty dotykových napětí uvádí norma ČSN EN 50122-1, povolené hodnoty jsou udávány v závislosti na čase.



Obr. 1 Principiální schéma moderního vozidla na soustavě DC 3 kV s asynchronními motory

Při elektrodynamickém brzdění (dále jen EDB), které je nastaveno změnou řízení střídače (zjednodušeně si to lze představit tak, že střídače generují napětí o nižší frekvenci, než odpovídá synchronní frekvenci motorů při daných otáčkách, čímž začnou fungovat jako asynchronní generátory), je opačný tok energie tj. z trakčních motorů přes střídač do meziobvodu. Střídač do meziobvodu tedy dodává stejnosměrný proud (I_{EDB}), který nabíjí kondenzátor (zvyšuje napětí). Pokud je v blízkosti brzdícího vozidla dostatečně velký odběr, veškerý proud I_{EDB} teče zpět do trolejového vedení jako proud z rekuperace (I_{Rek}). Pokud ovšem v blízkosti není žádný nebo jen nízký odběr, proud I_{EDB} dále zvyšuje napětí v meziobvodu do té chvíle, dokud nedosáhne hraniční hodnoty nastavené pro sepnutí brzdného měniče. Tato hraniční hodnota musí být nastavena výše než maximální hodnota napětí TNS, aby tento měnič nespínal i při běžných provozních hodnotách např. v blízkosti TNS. Sepnutím brzdného měniče dojde k vybití kondenzátoru pod spodní hraniční hodnotu a měnič se vypíná. Tento děj se cyklicky opakuje. Pokud tedy není v blízkosti vozidla dostatečný odběr, část výkonu elektrodynamické brzdy se spotřebovává na brzdovém odporníku. O tom jak velká část tohoto výkonu se spotřebovává rozhoduje pouze velikost a poloha odběru (vůči brzdícímu vozidlu) v trakčním vedení. Řízené dělení výkonu mezi rekuperaci a brzdový odporník se neprovádí (i když je teoreticky možné).

Z daného popisu je zřejmé, že rekuperace je pro moderní hnací vozidla samozřejmostí a nevyžaduje žádné přídavné zařízení. Pokud bychom chtěli rekuperaci naopak zabránit a zachovat funkční EDB, je nutné při brzdění odpojit meziobvod od trakčního vedení (dále jen TV) např. stykačem nebo polovodičovým spínacím prvkem. Dále je nutné si uvědomit tu skutečnost, že ačkoliv je proud rekuperace při nulovém odběru v TV taktéž nulový, udržuje vozidlo TV pod napětím a může tím pádem maskovat vypnutí TV v TNS.

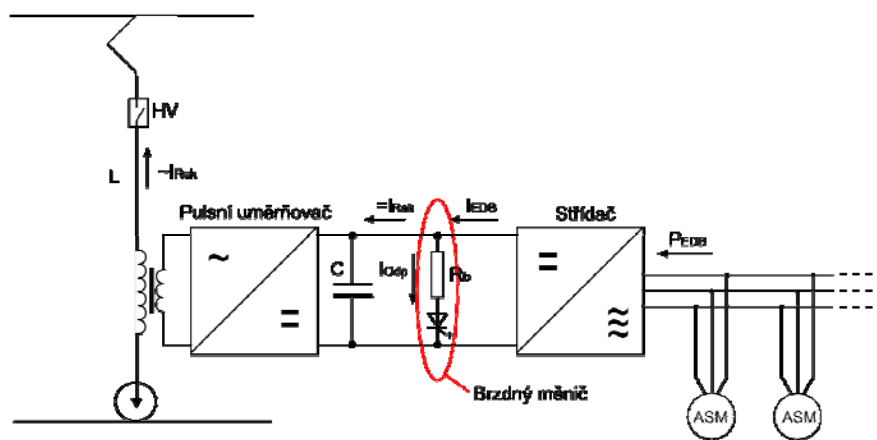
Vozidlo na soustavě AC 25 kV / 50 Hz

Na obr. 2 lze vidět principiální schéma moderního vozidla na soustavě AC 25 kV / 50 Hz s asynchronními motory. Obvod s asynchronními motory, střídačem, stejnosměrným meziobvodem a brzdným měničem je shodný jako na vozidle na soustavě DC. Meziobvod je napájen z pulsního usměrňovače (topologicky shodným s jednofázových střídačem). Tento usměrňovač má za úkol jednak

stabilizovat napětí v meziobvodu a vedle toho odebírat ze sítě přibližně sinusový proud s účinníkem blízkým 1. Usměrňovač je napájen z trakčního transformátoru.

Při elektrodynamické brzdě je pulsní usměrňovač řízen jako jednofázový střídač, který dodává činný proud do TV. Pokud je v TV opět dostatečný odběr, veškerý výkon EDB jde do TV, v opačném případě se část výkonu opět spotřebovává na brzděném odporu.

Vzhledem k tomu, že TV soustavy AC 25 kV / 50 Hz je přímo napájené z trakčního transformátoru v TNS, který nepředstavuje pro zpětný rekuperovaný proud žádnou překážku, je možno předpokládat téměř vždy dostatečný odběr v TV. V případě vozidel určených pouze pro AC systémy někteří provozovatelé ani brzděný odporník nevyžadují. Určité problémy s uplatněním rekuperace lze očekávat u velmi dlouhých úseků, kdy vlivem úbytků na TV není možné ani při dosažení maximálního povoleného napěťového limitu (U_{max2}) dodat do TNS veškerý výkon dodaný EDB.



Obr. 2 Principiální schéma moderního vozidla na soustavě AC 25 kV / 50 Hz s asynchronními motory

Koordinace ochran hnacího vozidla a TNS

Z platné legislativy plynou dva zásadní požadavky na součinnost hnacího vozidla umožňujícího rekuperaci a infrastruktury:

- 1) vozidlo musí ukončit rekuperaci, pokud dojde ke ztrátě napětí,
- 2) vozidlo musí ukončit rekuperaci, pokud dojde ke zkratu v daném napájecím úseku.

Požadavek 2) je možné dále rozdělit na dva problémy:

- a) vozidlo smí rekuperovat pouze takovou velikostí proudu, aby nezabránilo detekci zkratu trakční napájecí stanicí;
- b) vozidlo musí ukončit rekuperaci do úseku se zkratem potom, co došlo k vypnutí úseku z TNS.

Koordinace ochran na soustavě DC 3 kV

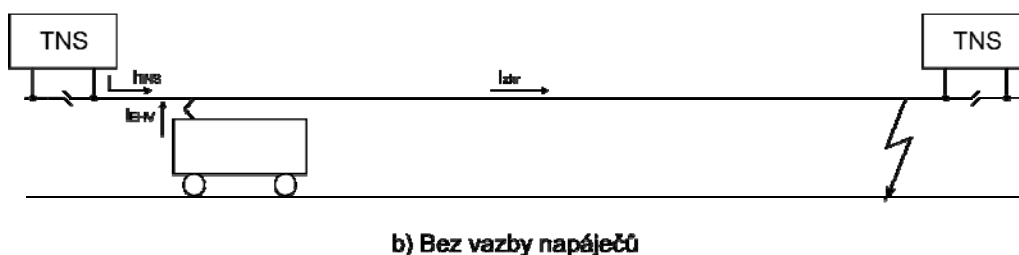
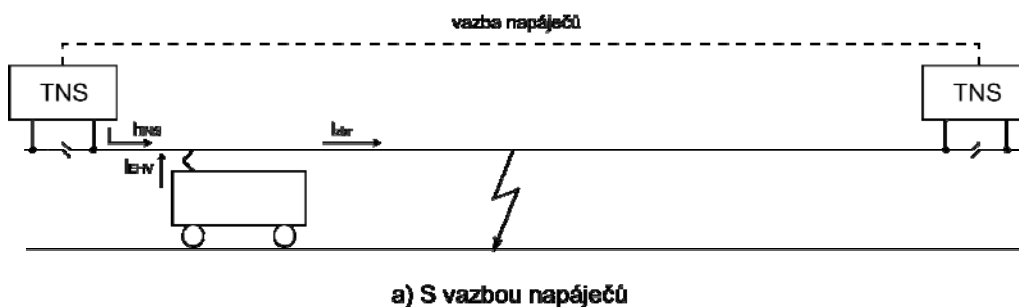
Napájecí úseky TV jsou na této soustavě obvykle napájeny oboustranně s vazbou napáječů (vazba znamená, že při vypnutí jednoho napáječového rychlovypínače dochází k okamžitému vypnutí „svázaného“ sousedního

napáječového rychlo vypínače). Délky úseků se pohybují od 10 do 25 km, v některých případech však i přes 30 km. Dlouhé jednostranně napájené úseky jsou ojedinělé, avšak mohou vzniknout při výlukách TNS. Pro zlepšení napěťových poměrů v TV se v některých případech využívají SpS, které dělí napájecí úsek přibližně na polovinu. Ochrana před účinky zkratu v napájecím úseku se děje napáječovými rychlo vypínači, které vypínají na základě nadproudu. Nastavení rychlo vypínačů se provádí obvykle podle minimálního zkratového proudu, který může vzniknout v napájecí úseku. Tento minimální zkratový proud je předpokládán při zkratu na konci napájecího úseku při nefunkční vazbě napáječů, v opačném případě se předpokládá při zkratu uprostřed úseku. Použití vazeb napáječů tedy umožňuje vyšší nastavení vypínacího proudu na napáječovém rychlo vypínači.

Ačkoliv má tato soustava relativně nízké napětí v porovnání s vysokým výkonem moderních vozidel, lze očekávat problémy se splněním požadavků na rekuperaci pouze v určitých případech.

Požadavek 1) není možné technicky zajistit, protože při rekuperaci vozidlo udržuje TV pod napětím a případné vypnutí úseku nelze na vozidle detekovat. Vysvětlení viz kapitola *Princip funkce rekuperační elektrodynamické brzdy*. Jelikož se ovšem nejedná o závažný bezpečnostní problém, není tato funkce na soustavě DC 3 kV požadována.

Požadavek 2) a) představuje závažný problém z pohledu infrastruktury. Nejhorším případem je stav, kdy se rekuperující vozidlo pohybuje v blízkosti TNS a zkrat vznikne uprostřed respektive na konci úseku, viz obr. 3. Situaci si lze představit tak, že se jedná o dva paralelně řazené zdroje pracující do společné zátěže (odpor TV k místu zkratu). Z logiky věci tedy vyplývá, že zkratový proud I_{zkr} se dělí mezi TNS a rekuperující vozidlo – tedy na proudy I_{TNS} a I_{EHV} . V případě dlouhých úseků, kdy je napáječový rychlo vypínač nastaven s minimální rezervou od min. zkratového proudu, to může zabránit detekci zkratu jak na TNS tak na vlastním vozidle (detekce je prováděna obdobně jako na TNS – tedy na základě nadproudu a případně podpětí).



Obr 3. Zkrat v úseku s rekuperujícím vozidlem – nejnepříznivější stav

Z tohoto pohledu se jako nejkritičtější úseky jeví dlouhé dvoustranně napájené úseky bez vazeb napáječů, popř. dlouhé jednostranně napájené úseky. Řešením dané situace, bez nákladné investice do mnohde již rekonstruované infrastruktury, je operativní popřípadě trvalý zákaz rekuperace v kritickém úseku. Operativní zákaz rekuperace by se týkal např. úseků, na kterých probíhá výluka TNS, kdy se napájí přilehlé úseky jednostranně ze sousedních TNS, popř. při přerušení vazby napáječů.

Požadavek 2) b) není na rozdíl od předchozího závislý na způsobu napájení ani na funkčnosti vazeb napáječů. Pokud dojde k vypnutí úseku napájecí stanicí, je veškerý zkratový proud odebírán z rekuperujícího vozidla. Tehdy má vozidlo reálnou možnost detekovat zkrat na základě nadproudu nebo podpětí. Kritické zde jsou zkraty v největší možné vzdálenosti od hnacího vozidla, tedy na konci napájecího úseku. Situaci významným způsobem zlepšují SpS, pokud jsou v daném meziměřírenském úseku zbudovány. Z tohoto pohledu budou kritické dlouhé úseky v kombinaci s malým průřezem vodičů TV. Řešením bez dalších investic je pouze trvalý zákaz rekuperace v kritickém úseku.

Závěrem k rekuperaci na DC soustavě je nutno říci, že zmiňované problémy se týkají pouze vybraných úseků mimo koridorové tratě. Pro budoucí modernizace tratí lze jednoznačně vypíchnout důsledné budování SpS, které nejen vylepšují podmínky z pohledu zkratů, ale taktéž vylepšují podmínky pro spotřebu rekuperované energie (SpS propojují mimo jiné TV sousedních kolejí u dvoukolejných tratí a dávají tak větší šanci spotřebovat rekuperovanou energii vozidly jedoucími po sousední koleji, než v případě úseku bez SpS, kde rekuperovaný proud jde do TV sousední koleje přes sběrnou 3 kV v TNS, tudíž po významně delší cestě).

Koordinace ochran na soustavě AC 25 kV / 50 Hz

Oproti soustavě DC 3 kV jsou napájecí úseky na soustavě AC provozovány zásadně jednostranně z důvodu zabránění vzniku vyrovnávacích proudů mezi TNS. Sousední TNS navíc bývají někdy připojeny na různé fáze distribuční soustavy, tudíž jejich propojení by způsobilo mezifázový zkrat. Vzdálenost mezi TNS bývá 30 až 60 km, z toho vyplývá délka jednoho napájecího úseku okolo 15 až 30 km. Napájecí úseky jsou mezi sebou odděleny elektrickým dělením s neutrálním polem, které zamezuje propojení obou úseků smykadlem sběrače. V případě výluky TNS, jsou napájeny přilehlé napájecí úseky ze sousedních TNS. Na soustavě AC se taktéž používají SpS, avšak jejich zapojení je odlišné od SpS na DC soustavě (spojují stopy TV buď pouze příčně nebo pouze podélně, nepoužívá se zapojení do „hvězdy“ jako na DC soustavě).

Způsob detekce zkratu na TNS případně SpS je taktéž odlišný od soustavy DC. Nadproudová ochrana je nastavena obvykle na proud odpovídající blízkým zkratům, popř. dle jiných kritérií. Vzdálené zkraty jsou detekovány tzv. distanční ochranou, která měří hodnotu a charakter impedance TV. Jelikož je zkratový proud omezen hlavně impedancí TV a rozptylovou indukčností trakčního transformátoru, jsou tyto proudy dobře odlišitelné od trakčního proudu díky tomu, že mají nízký účinník induktivního charakteru. K účinku distanční ochrany dochází od určité hodnoty proudu a při poklesu účinníku pod stanovenou hodnotu, přičemž se sleduje i charakter účinníku (ochrana účinkuje pouze při induktivním účinníku).

Obecně lze k požadovaným podmínkám pro rekuperaci konstatovat, že zde je velkou výhodou vyšší napětí nežli u DC soustavy. Díky tomu je proud vozidla při rekuperaci významně nižší než minimální zkratové proudy a tím pádem je vliv rekuperujícího vozidla na ochrany TNS a SpS minimální.

Požadavek 1) je bez problému splněn tím, že vozidlo se snaží do TV dodávat pouze činný proud (dáno regulací účinníku pulsního usměřovače), což při odpojení TNS, která jinak do TV dodává potřebnou jalovou energii, vede k selhání regulace účinníku pulsního usměřovače s jeho následným zablokováním (vypnutím). K zablokování usměřovače dojde v řádu několika desítek až stovek ms.

Požadavek 2) a) nepředstavuje taktéž problém z důvodu použití distančních ochran. Jelikož rekuperující vozidlo dodává výhradně činný proud mnohem menší než vlastní zkratový proud, ve kterém převládá jalová induktivní složka, nedochází na TNS event. SpS k významnému ovlivnění velikosti zkratového proudu ani jeho účinníku. Bezpečná funkce distanční ochrany je tudíž zachována.

Požadavek 2) b) je taktéž bezproblémově splněn. Vzhledem k použitému napětí je i vzdálený zkrat na vozidle rozpoznatelný nadproudovou nebo podpětovou ochranou. V případě extrémně dlouhých úseků při výlukách TNS, kdy by nemuselo dojít k vybavení nadproudové nebo podpětové ochrany, dojde díky induktivnímu charakteru zkratového proudu, podobně jako je tomu u vypnutí TV, k selhání regulace účinníku a zablokování pulsního usměřovače.

Z nastíněných faktů je zřejmé, že rekuperace na soustavě AC 25 kV / 50 Hz nepředstavuje problém z pohledu bezpečnosti. Hlavním důvodem je použití vyššího napětí než u DC trakce. Stejně tak spotřeba rekuperované energie není problém, protože pokud není v TV dostatečný odběr, je tato energie předána do distribuční sítě, kde je vzhledem k výkonu vozidla a napětí v síti (110 kV) bez problému spotřebována. Tento způsob není bohužel na DC soustavě možné využít, protože usměřovač neumožňuje zpětný tok energie do distribuční soustavy.

K dosažení cílového stavu na AC soustavě je nezbytné dořešit ještě několik spíše administrativních otázek. Za všechny lze uvést stále nejasný pohled nadřazených distribučních soustav a obchodníků s elektřinou na rekuperovanou energii. Pokud by na hnací vozidla bylo pohlíženo jako na zdroje, bylo by ve smyslu platné legislativy nutno velmi složitě žádat o jejich připojení, stanovovat diagramy dodávek (které jsou samozřejmě téměř nepredikovatelné), nehledě na nutnost opatřit si na takovou činnost licenci. Mnohem přátelštěji se jeví možnost chápat tuto energii, jako energii vznikající při provozu nějakého zařízení (tedy jako vedlejší efekt). Třetí variantou, komplementární s variantou první je pohlížet na hnací vozidla jako na zdroje „zelené“ energie s uplatněním všech existujících zvýhodnění.

Závěr

Článek se snaží nastínit problematiku, kterou je nutno řešit na pozadí povolování rekuperace na síti SŽDC. Cílem je jednak stanovení jednotných podmínek, které musí splňovat vozidla vybavená rekuperační elektrodynamickou brzdou na straně jedné a vyřešení problémů s dodávkou rekuperované energie do distribuční soustavy na straně druhé. Tento článek se snaží tímto upozornit širší odbornou veřejnost na důsledky rekuperace na obou dominantních napájecích soustavách, o kterých nebylo doposud široce diskutováno.

Literatura

- [1] ČSN EN 50388. *Drážní zařízení - Napájení a drážní vozidla - Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanice) a drážními vozidly pro dosažení interoperability*. Praha : ČNI, 2006. 43 s.
- [2] ČSN EN 50163 ed.2. *Drážní zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav*. Praha : ČNI, 2005.
- [3] SŽDC (ČSD) SR 34 (E). *Nastavovanie, prevadzka a údržba reléových ochrán trakčného napájacieho obvodu*. Praha : Federálne ministerstvo dopravy, 1979. 50 s.

Praha, únor 2011

Lektoroval: Ing. Jiří Hajzl
SŽDC, s.o.