





Číslo změny:	Obsah změny:	Datum změny:
01	Zpracování připomínek	10.2016
02	-	-
03	-	-

Investor:	Ministerstvo dopravy	Ministerstvo dopravy nábřeží Ludvíka Svobody 1222 110 15 Praha 1
-----------	----------------------	--

Zhotovitel:	SDRUŽENÍ SP + SPB TSI ENE	Zastoupené společnosti SUDOP PRAHA a.s. Olšanská 1a, 130 80 Praha 3 tel.: +420 267 094 111 e-mail: praha@sudop.cz
 		
Hlavní inženýr projektu: ING. JAROSLAV PEROUTKA		Datum: 07/2016

Středisko: ELEKTROTECHNIKY, TRAKCE, SDĚLOVACÍ A ZABEZPEČOVACÍ TECHNIKY			
Vedoucí střediska:  ING. MARTIN RAIBR	Odpovědný projektant SO, IO, PS:  ING. JAROSLAV PEROUTKA	Vypracoval:  ING. JAROSLAV PEROUTKA	Kontroloval:  ING. MARTIN RAIBR

Název akce:	Číslo smlouvy:
Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění požadavků TSI ENE	15 523 208
	Projektový stupeň: Studie
Část:	Datum: 07/2016
ÚVOD	Číslo částí: 1.

**Studie „Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve
vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění
požadavků TSI ENE“**

1. ÚVOD

<i>Objednatel</i>	Česká republika – Ministerstvo dopravy
<i>Zpracovatel</i>	SUDOP Praha a. s.
	SUDOP Brno, spol.sr.o.

Objednatel:

Česká republika – Ministerstvo dopravy
nábřeží Ludvíka Svobody 1222
110 15 Praha 1

Zhotovitel:

SUDOP PRAHA a.s
Olšanská 1a
130 80 Praha 3

SUDOP Brno, spol. s r.o.
Kounicova 688/26
611 36 Brno – střed

Obsah

1.1	Úvod.....	3
1.2	Napájecí soustavy používané v Evropě.....	9
1.2.1	Soustavy střídavé	10
1.2.1.1	15 kV, 16,7 Hz (dříve 16 2/3 Hz).....	10
1.2.1.2.	25 kV, 50 Hz.....	11
1.2.1.3	25 kV, 50 Hz systém jednotné fáze	13
1.2.1.4	2 x 25 kV, 50 Hz	14
1.2.2	Soustava stejnosměrná.....	15
1.2.2.1	600 V stejnosměrných.....	15
1.2.2.2	750 V stejnosměrných.....	15
1.2.2.3	1,5 kV stejnosměrné	16
1.2.2.4	3 kV stejnosměrné.....	16

1.1 Úvod

Hlavním cílem studie je, zodpovědět otázku, zda je nutné přejít ze stávajícího systému napájení 3kV na jiný a pokud ano, tak v jakém horizontu. Dále stanovit harmonogram přechodu a finančně tento přechod ohodnotit.

Vláda ČR přijala dne 19.5.2015 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR předloženou Aktualizovanou státní energetickou koncepci (viz Usnesení vlády ČR č. 362/2015). Z té vyplývá, že doprava je významným spotřebitelem energie, na konečné spotřebě energie se podílí 21 % (pro srovnání: vytápění budov spotřebuje 18 % energie). Proto se dopravy citelně dotknou chystané změny v energetické koncepci státu. Ve vládou přijatém dokumentu je stanoveno:

- snížení spotřeby ropných produktů v dopravě z aktuální úrovně 59 miliard kWh/rok v roce 2015 na 50 miliard kWh/rok v roce 2030,
- zvýšení využití elektrické energie v dopravě z aktuální úrovně 2,4 miliard kWh/rok v roce 2015 na 4,3 miliard kWh/rok v roce 2030.

K naplnění cíle státní energetické koncepce ČR nahradit roční spotřebu 9 miliard kWh energie ropných paliv (tedy 900 milionů litrů nafty či benzínu) roční spotřebu 1,9 miliard kWh energie, to znamená 4,6 krát méně, není reálně splnitelný jen prostou náhradou automobilů poháněných ropnými palivy automobily poháněnými elektřinou. V takovém případě by bylo možno počítat s faktorem úspory jen přibližně 2,5 (1 kWh elektrické energie nahradí 2,5 kWh energie ropných paliv), což je dáno poměrem účinnosti elektromotoru a spalovacího motoru. Nikoliv požadovaných 4,6.

Základem proto musí být prioritně převedení dopravy z automobilů poháněných spalovacími motory na elektrifikované železnice. V takovém případě 1 kWh elektrické energie dokáže nahradit 7,5 kWh energie ropných produktů, neboť kromě zvýšení účinnosti (faktor úspory 2,5) působí i efekt poklesu trakční práce převedení dopravy ze silnic na železnice s menším valivým odporem a s menším aerodynamickým odporem vozidel jedoucích v zákrytu (faktor úspory 3), tedy v součinu je dosažen faktor úspory 7,5.

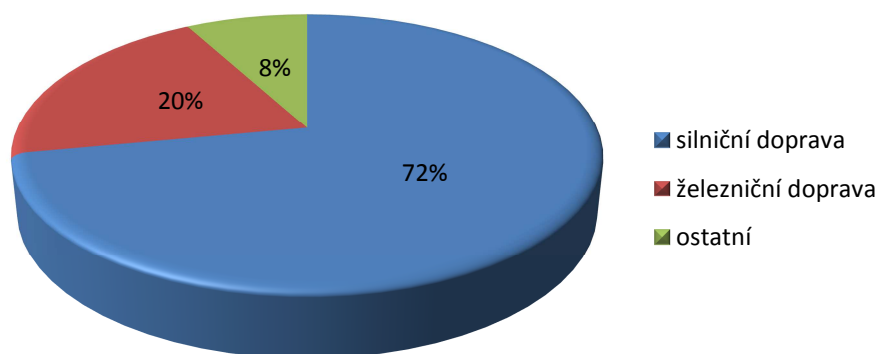
Tato orientace je plně v souladu se strategií EU, která je mimo jiné popsána v dokumentu Evropské komise Bílá kniha – plán jednotného evropského dopravního prostoru (EU KOM (2011) 144). Základem evropské strategie je snížit dosavadní 96 % závislost energií pro dopravu v EU na ropných palivech a jejich náhražkách ve prospěch elektrické energie. K tomu stanoví nástroje, mezi které patří převedení nákladní dopravy nad 300 km ze silnic na (elektrifikované) železnice, náhrada silniční a letecké přepravy osob na střední vzdálenosti rychlou železniční dopravou či náhrada příměstské automobilové dopravy železnicí.

Velice závažné důsledky pro ČR vyplynou ze závazku, který je obsahem závěrečného protokolu z Pařížské klimatické konference OSN ze dne 12.12.2015, kterou za ČR podepsal v New Yorku (podobně jako zástupci 175 zemí světa) dne 22.4.2016 ministr životního prostředí Richard Brabec.

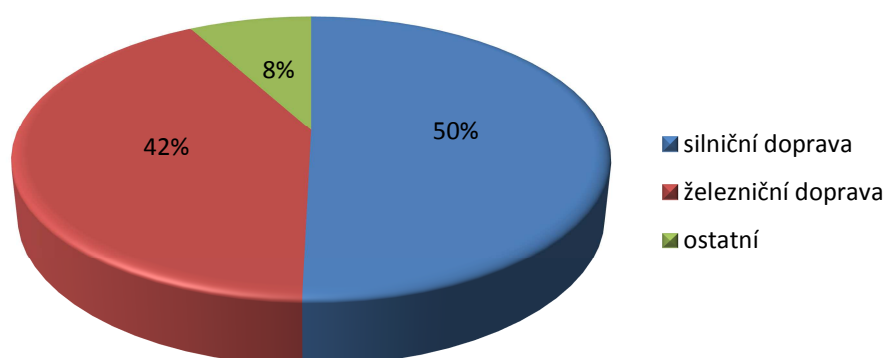
Závazek nezvýšit oteplení Země o více než 1,5 °C až 2 °C znamená již nevypouštět spalováním fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn) více než 750 až 1 500 miliard t CO₂. To při vědomí roční produkce oxidu uhličitého na úrovni roku 2015, která činila 32 miliard t CO₂, znamená velmi drastické snižování spotřeby fosilních paliv to až na nulu (cílový stav).

Převod nákladní dopravy ze silnic na železnice je též promítnut do úrovně vládních dokumentů ČR. Usnesení vlád č. 978/2015 (Národní plán snižování emisí) ukládá resortu dopravy převést do roku 2030 30 % silniční nákladní dopravy na železnici. To při uvážení výchozího stavu (silniční doprava se na přepravních výkonech podílí 72 %, železnice 20 %) a růstových trendů znamená zvýšit do roku 2030 přepravní výkony nákladní železniční dopravy na 273 % přepravních výkonů roku 2015.

Stávající rozdělení nákladní dopravy

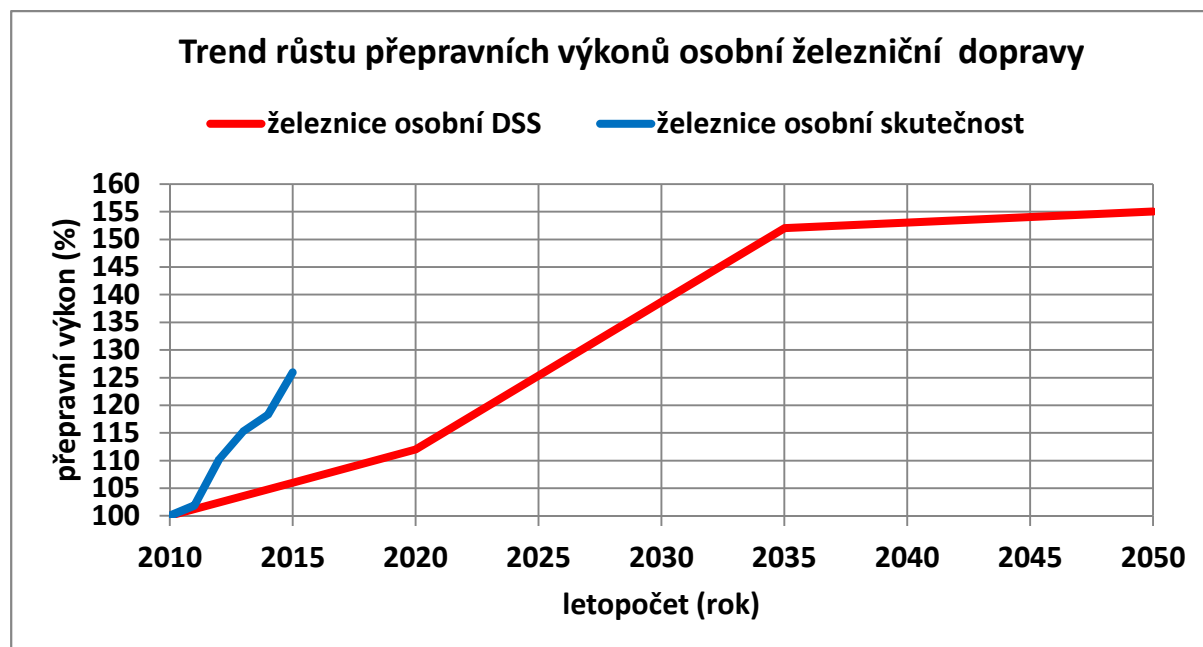


Rozdělení nákladní dopravy po přesunu 30% na železnici



Velmi intenzivně se rozvíjí osobní železniční doprava. Od roku 2010 rostou přepravní výkony osobní železniční dopravy v průměru ročně o 5,2 %/rok, což je násobně více, než jak předpokládala Dopravní sektorová strategie (1,2 % /rok) – přepravních výkonů prognózovaných na rok 2025 již bylo dosaženo v roce 2015. Tempo růstu přepravních výkonů osobní železniční dopravy se zvyšuje, mezi roky 2014 a 2015 dosáhl nárůst 7,7 % úrovně roku 2010. A mezi 1. čtvrtletím roku 2015 a prvním čtvrtletím roku

2016 dokonce meziročně o 9,4 %. Výrazný růst střední přepravní vzdálenosti (ze 40 km v úrovni roku 2010 na cca 50 km v úrovni roku 2016) dokládá, že příčinou poptávky ze strany cestujících je dálková železniční doprava.



Zájem dopravců o využití železniční sítě v ČR je velmi nerovnoměrný. Cestujícími i přepravci jsou vyhledávány především elektrifikované tratě sítě TET – T a nesou tíhu dopravního provozu železnic v ČR:

- tratě sítě TEN-T (až na výjimky elektrizované) reprezentují pouhých 27 % délky sítě a zajišťují 84 % dopravních výkonů (střední dopravní tok 850 t/h),
- tratě celostátní (zpravidla bez elektrizace) reprezentují 32 % délky sítě a zajišťují jen 12 % dopravních výkonů (střední dopravní tok 160 t/h),
- tratě regionální (až na výjimky bez elektrizace) reprezentují 41 % délky sítě a zajišťují pouhých 4 % dopravních výkonů (střední dopravní tok 40 t/h).

Jedna část sítě je silně přetížena a dopravci se potýkají s nedostatkem kapacity, druhá část sítě postrádá zájem o přepravu.

Elektrické napájení drah (strukturální subsystém Energie) je výrazným nástrojem k řešení obou uvedených záležitostí:

- a) zvýšení výkonnosti pevných trakčních zařízení umožní zvýšený rozsah dopravního zatížení hlavních tratí sítě TEN-T, zejména RFC koridorů podle Nařízení Evropského parlamentu a rady č. 1316/2013. Jde jak o zvýšení dopravní výkonnosti tratí (jízda vlaků v těsnějším sledu, a to i ve vazbě na potenciál možností ETCS), tak i o pokrytí výkonových potřeb těžších vlaků. Vyšší nároky na napájení též souvisí s růstem rychlostí vlaků všech kategorií. Aerodynamická složka jízdního odporu vozidel roste s druhou mocninou rychlosti, výkon potřebný na její

překonání roste s druhou mocninou rychlosti, odpovídající výkon roste se třetí mocninou rychlosti a ztráty v trakčním vedení (ri^2) rostou dokonce se šestou mocninou rychlosti.

- b) Elektrizací dalších tratí s potenciálem růstu přepravních výkonů využít k uspokojení rostoucímu zájmu o železniční dopravu i další část železniční sítě - dosud neelektrifikované železniční tratě a nabídnou na nich rychlejší a levnější dopravu, než jakou umožňuje naftový provoz. Na trhu běžně dostupná běžná trakční vozidla elektrické trakce závislé se výrazně liší svými technickými i ekonomickými parametry od vozidel naftových:

- měrný trakční výkon (určuje rychlost jízdy): elektrické lokomotivy cca 80 kW/t, naftové lokomotivy cca 20 kW/t,
- měrný trakční výkon (určuje rychlost jízdy): elektrické regionální jednotky cca 12 kW/t, naftové regionální jednotky cca 6 kW/t,
- měrná pořizovací cena: elektrické lokomotivy cca 17 000 Kč/kW, motorové lokomotivy cca 45 000 Kč/kW,
- měrné náklady na trakční energii: elektrická vozba cca 2,70 Kč/kWh, naftová vozba cca 7 Kč/kWh,
- měrné náklady na údržbu: elektrická lokomotiva cca 15 Kč/km, naftová lokomotiva cca 30 Kč/km.

Dokladem této skutečnosti je téměř nulový zájem o nákladní dopravu na neelektrizovaných tratích (železnice není v naftové vozbě schopna nabídnout kratší časy a nižší cenu, než silniční doprava) a přetížení elektrizovaných tratí (železnice je v elektrické vozbě schopna nabídnout kratší časy a nižší cenu, než silniční doprava)

Oba tyto kroky souvisí s přenosovou schopností vedení, tedy se schopností hospodárně přenášet výkon na určitou vzdálenost. Ta je definována poměrem ztrát výkonu k přenášenému výkonu:

$$p = \Delta P / P = RI^2 / UI = R \cdot P / U^2 = r \cdot L \cdot P / U^2$$

p ... poměrné ztráty přenosem energie

ΔP ... ztráty přenosem energie

P ... přenášený výkon

R ... odpor vedení

r ... gradient odporu vedení

L ... délka vedení

U ... napětí

I ... proud

Skutečnost, že přenosová schopnost vedení stoupá s druhou mocninou napětí, se již v minulosti stala příčinou použití vysokého napětí a to jak v energetice (přenosové i distribuční sítě), tak i na železnici. Přechod ze systému 3 kV na systém 25 kV znamená (při stejné vzdálenosti a stejném odporu vedení) snížení ztrát ve vedení v poměru $(25/3)^2 = 8,3^2 = 69$. Tedy za stejných podmínek (stejný výkon, stejný odpor vedení, stejný účinník) jsou ztráty ve vedení při napětí 3 kV 69 krát větší, než při napětí 25 kV. Tedy tam, kde pracuje vedení 25 kV s účinností 99,5 %, pracuje vedení 3 kV s účinností 65,5 %..

Kromě zásadního snížení ztrát energie v trakčním vedení (které u systému 3 kV činí běžně kolem 20 až 30 %) má přechod ze 3 kV na 25 kV i významný dopad na obě výše popsané záležitosti:

ad a) na hlavních tratích došlo v průběhu času od jejich elektrizace v době před cca 60 lety ke zvýšení rychlosti jízdy vlaků osobní přepravy i nákladních vlaků s důsledkem nutnosti zvýšení jmenovitého výkonu trakčních vozidel z někdejších 2 MW na současných 6 MW, tedy na trojnásobek. Otázka pokrytí tohoto výkonu ze strany pevných trakčních zařízení není dána jen výkonem trakčních napájecích stanic, ale zejména schopností trakčního vedení tento výkon přivést od napájecí stanice k vlaku. Důsledkem nízké přenosové schopnosti vedení jsou vysoké ztráty výkonu a velké úbytky napětí mezi napájecí stanicí a vozidlem (nesplnění požadavků ČSN EN 50 388 na kvalitu napájení) s důsledkem poklesu výkonu vozidla s dopadem na nedodržování jízdním řádem stanovených jízdních dob. Závažným důsledkem výkonového přetěžování systému 3 kV vůči hodnotám, na které byl kdysi dimenzován, jsou i vysoké hodnoty úbytku napětí na kolejnicích, což je i praktickým dopadem zlepšení mechanických vlastností kolejnic legováním oceli, ovšem na úkor snížení jejich elektrické vodivosti. Důsledkem je překračování dovolených hodnot napětí vůči vzdálené zemi podle EN 50 122-1. To má vážné dopady nejen z hlediska bezpečnosti osob, ale i z hlediska iniciace bludných proudů (zemí) a podélných proudů (vozidly vlaků) a vzniku vážných poruch při náhodném spojení kolejnice, respektive s ní spojených vodivých konstrukcí, s ochranným vodičem distribuční sítě 3 x 400 V / 230 V či s uzemněním bleskosvodů. Tyto poruchy mohou mít velmi vážné důsledky (selhání funkce ochrany před nebezpečným dotykem neživých částí, selhání funkce bleskosvodu, požár iniciovaný přetížením vodičů).

ad b) Nízká přenosová schopnost trakčního vedení v systému 3 kV neumožňuje hospodárně elektrizovat jednokolejné, dopravně málo zatížené tratě. Vodiče musí mít velké průřezy (bohatě dimenzované zesilovací vedení), napájecí stanice (měnirny) o relativně vysokém výkonu je nutno budovat blízko sebe, tedy ve velkém počtu. Jejich využití (poměr středního a jmenovitého výkonu) je velmi nízké (jednotky procent). To vytváří velmi špatné podmínky pro rentabilitu projektu elektrizace. Systém 25 kV umožňuje díky své vyšší přenosové schopnosti stavět napájecí stanice na větší vzdálenost a využívat levnější a lehčí trakční vedení. To se projevuje zejména u páteřových tratí. Jsou-li elektrifikovány systémem 25 kV, tak lze okolní tratě do značné vzdálenosti elektrifikovat prakticky jen za náklady na vybudování trakčního vedení, bez potřeby budovat nové napájecí stanice.

Rovněž nelze zapomenout na budování vysokorychlostních železnic podle TSI HS na území ČR ve smyslu nařízení Evropského parlamentu a rady č. 1315/2013, které se již v krátké době stane realitou. Vysokorychlostní tratě přivedou napájecí napětí 25 kV do železničních uzlů Ústí nad Labem, Praha, Přerov a Ostrava. Je velice rozumné, aby byl plán výstavby vysokorychlostních železnic v ČR termínově sladěn s průběhem konverze systému 3 kV na systém 25 kV, aby se předešlo zbytečným investicím do budování stykových míst i provozním komplikacím s nimi spojenými.

Je velice zásadní skutečností, že v nejnovějším dokumentu a velmi zásadním dokumentu EU, ve zprávě Evropského účetního dvora EU, který analyzuje pomalý průběh strategicky důležitého přesunu nákladní dopravy ze silnic na železnice, je na straně 42 v bodě 62 b uvedeno doslova:

„V členských státech a někdy i v jednom členském státě (například v České republice a ve Francii) jsou v provozu různé elektrizační systémy. Problémy může způsobit i nedostatek elektrizovaných tratí.“

V zásadě lze tento výrok Evropského účetního dvora vnímat jako vyzvání ČR ze strany EU, aby sjednotila elektrizační systémy a elektrizovala další důležité tratě. Tedy lze očekávat, že iniciativa ČR směrem ke konverzi systému 3 kV na jednotný systém 25 kV a z něho vyplývající snadnější elektrizaci dalších tratí najde u centrálních orgánů EU pozitivní odezvu a to i při přidělování dotací.

Na jednotný napájecí systém 25 kV / 50 Hz je potřebné přejít programově, a to tak, aby bylo optimálně využito již připravovaných modernizačních akcí na trakčním zařízení stávající železniční sítě, i budoucí výstavby vysokorychlostních tratí.

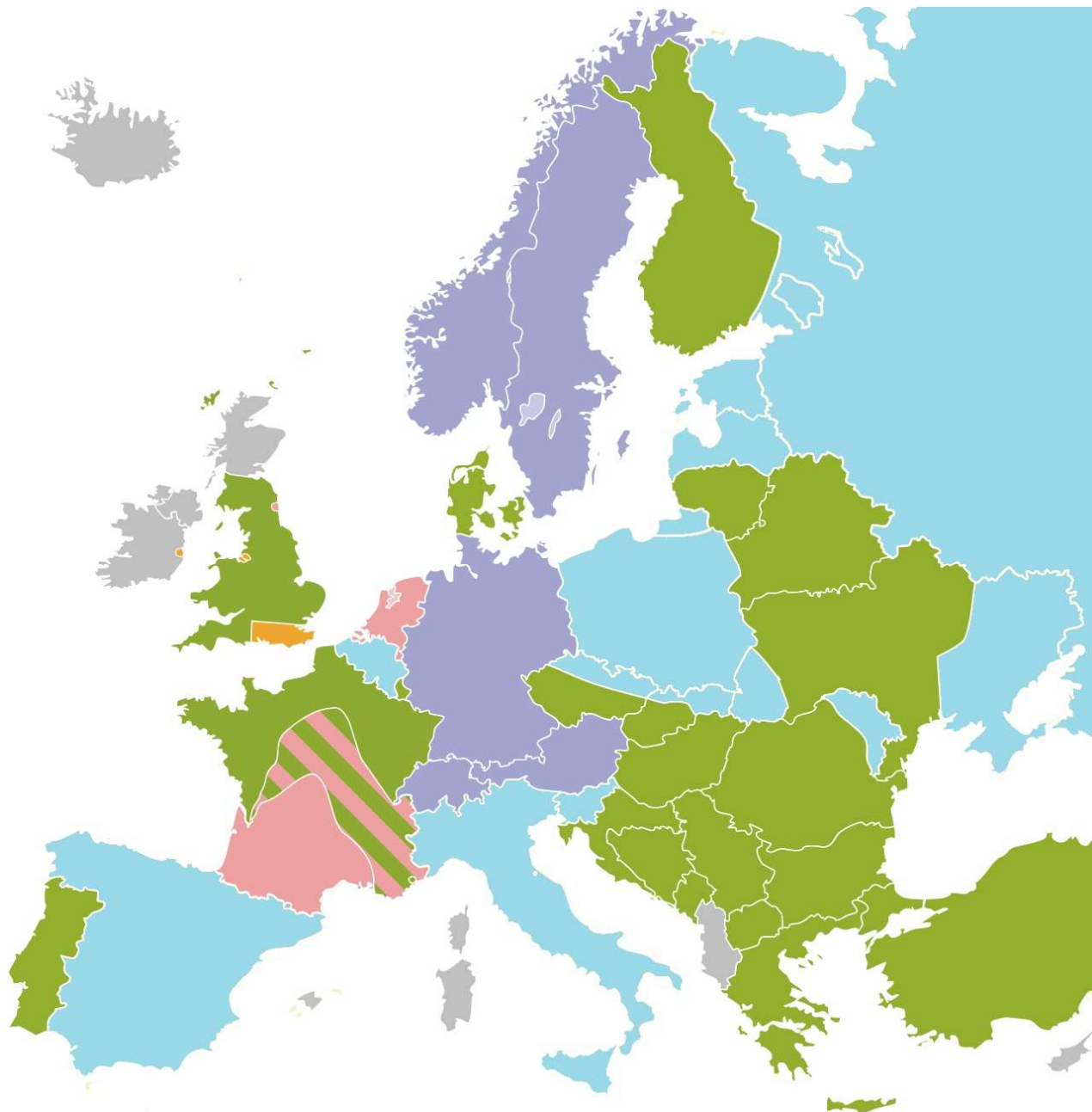
Současně je nutné brát zřetel na existující a potenciální přepravní vazby a provozní možnosti dopravců. Cílem je nalézt takový harmonogram, který bude znamenat jednak akceptovatelný dopad na stávající přepravní vazby zajišťované existujícím vozovým parkem a zároveň umožní maximálně využít výhod střídavého napájecího systému (jak z hlediska dopravců, tak z hlediska správce infrastruktury) pro rozvoj nových, zejména mezinárodních přeprav (převedených ze silniční dopravy na kombinovanou dopravu) na síti nákladních koridorů RFC5, RFC7, RFC8 a RFC9.

Součástí studie jsou potřebné investiční náklady včetně návrhu postupné realizace. V rámci ekonomické části jsou posouzeny ekonomické přínosy včetně návratnosti vložených investic.

1.2 Napájecí soustavy používané v Evropě

Historický stav před zahájením procesu konverze (aktuálně je systém 25 kV též aplikován ve Španělsku, na jihu Francie, v Itálii, Belgii, Holandsku):

750 V ss
 15 kV, 16,7 Hz
 3 kV ss
 1,5 kV ss
 25 kV, 50 Hz
 neelektrizováno



Charakteristiky základních napájecích soustav

1.2.1 Soustavy střídavé

Přenos elektrické energie v trakčním vedení se uskutečňuje napětím 10 až 25 kV, takže vodivý průřez trakčního vedení je možné ve srovnání se stejnosměrnými systémy podstatně zmenšit a stavět lehčí trakční vedení. Vzdálenost napájecích stanic je větší, než u stejnosměrných systémů a pohybuje se okolo 50 km podle zatížení trati. Střídavé napájecí soustavy působí rušivě na sdělovací zařízení a způsobuje nebezpečné indukované stavy na vedení podél tratí. Ochrany proti těmto vlivům (stíněné kabely) jsou nákladnější než u soustavy stejnosměrné. Kontinuálně probíhající programový odklon od používání metalických sdělovacích vedení směrem k bezdrátovému přenosu hovorů a informací, jakožto i k optickým vedením, činí tuto komplikaci rok od roku méně významnou. Lze předpokládat, že postupně téměř zanikne. Rušivé vlivy lze potlačit použitím zemního lana. Střídavé systémy negenerují škodlivé bludné proudy, proto je lze uzemnit, což zjednodušuje vedení zpětného proudu, ochranu před nebezpečným dotykem a vazbu na další systémy (bleskosvody, ochranné vodiče v distribučních sítích).

1.2.1.1 15 kV, 16,7 Hz (dříve 16 2/3 Hz)

Střídavé napětí o zvláštní frekvenci 16 2/3 Hz bylo pro napájení elektrických drah zavedeno ve Švýcarsku, Německu, Rakousku, Švédsku a Norsku již počátkem 20. století. Důvody byly technické – tuto frekvenci lze totiž ještě stále transformovat za použití běžných transformátorů a navíc je možno takto nízkou frekvenci ještě přímo použít pro napájení jednofázových komutátorových elektrických motorů bez použití usměrňovače. Tato vlastnost však již u soudobých vozidel se třífázovými frekvenčně řízenými trakčními motory ustoupila do pozadí.

Převádět na lokomotivě střídavý proud na stejnosměrný nebylo dříve snadné, byla k tomu potřeba těžká a rozměrná rotační soustrojí (motorgenerátory) nebo rtuťové usměrňovače, které potřebovaly ke svému provozu vysoký stupeň vakua a byly mechanicky choulostivé. Proto byl kmitočet střídavého napájecího napětí snížen na jednu třetinu. V Evropě tedy z obvyklých 50 Hz na 16 2/3 Hz. Celočíselný poměr 3 byl zvolen z důvodu realizace rotačních konvertorů, a to na bázi šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru. Snížení kmitočtu na jednu třetinu se ukázalo jako rozumný kompromis mezi zvětšením rozměrů transformátorů (ke kterému pochopitelně došlo) a zlepšenou komutací trakčních motorů, které bylo dosaženo s vynálezem komutačních pólů. Nižší kmitočet se též příznivě projevil ve snížení impedance trakčního vedení (induktivní reaktance $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$), která zvyšuje přenosovou schopnost vedení. Spolu s použitím dostatečně vysokého napětí napomohl ke snížení počtu napájecích stanic, neboť ty jsou díky poměrně malým úbytkům napětí schopny napájet poměrně dlouhé úseky. K dalším provozním přednostem tohoto systému patří spojitě dvoustranné napájení bez střídání fází, které umožňuje budovat levné jednoduché trakční vedení bez neutrálních polí a nepřerušované napájení trakčních vozidel, což je výhodné jak pro trakci (zejména při rekuperačním brzdění), tak pro pomocná zařízení (zejména klimatizaci a kuchyně).

Trakční soustava 16,7 Hz mívá podél trati vlastní přenosové vedení vyššího napětí (tzv. centralizované napájení). Není přímo navázána na třífázovou rozvodnou soustavu 50 Hz. Jedná se tedy o soustavu od rozvodné sítě izolovanou. Výhodou je stejný počet fází v trakčním i přenosovém vedení – odpadají potíže s nerovnoměrným zatížením fází a obchodní bariéry při odevzdávání rekuperované energie.

Rozvoj polovodičové techniky mírně modifikoval jmenovitou hodnotu kmitočtu. Poměr 1 : 3, tedy 16 2/3 Hz : 50 Hz, poplatný době používání rotačních měničů v systému napájení, byl v období elektronických měničů změněn na nesoudělný poměr 16,7 Hz : 50 Hz, a to z důvodu zamezení vzniku nežádoucích rezonančních jevů v rozvodné síti.

V zemích, kde byl tento systém zaveden, je nadále rozšiřován (včetně rozvoje vlastních elektráren, zejména bezemisních), a to i na vysokorychlostních tratích. Jeho objektivní nevýhodou je atypičnost řešení a nutnost vlastní napájecí sítě včetně elektráren.

1.2.1.2. 25 kV, 50 Hz

Proti jiným systémům nebylo nutné budovat měnírny ani zvláštní napájecí síť, trolejové napětí 25 kV bylo získáno pouhou transformací ze všeobecné elektrorozvodné sítě, která se z dnešního hlediska jeví jako nejperspektivnější. Avšak za cenu nerovnoměrného proudového zatížení třífázové distribuční sítě, která způsobuje nesymetrii třífázového napětí. Tato nesymetrie třífázového napětí škodí dalším odběratelům elektrické energie z distribuční sítě (zvýšený ohřev motorů). Proto je možné odebírat z třífázové sítě jen určitou hodnotu výkonu jednofázově, a to v závislosti na impedanci sítě (zkratovém výkonu) v místě odběru. V ČR bývalo dovoleno jednofázově odebírat 2 % zkratového výkonu distribuční sítě, aktuálně je to 0,7 %. Tento trend je dán povinnostmi energetických institucí dodávat odběratelům nezkreslené symetrické třífázové napětí.

Systém 25 kV vykazuje nejmenší ztráty způsobené přenosem a trakční napájení se dá velmi snadno přes transformátory napájet z běžné veřejné elektrorozvodné sítě resp. standardní elektrosoustavy. Problémem je nutnost rovnoměrného zatížení veřejné sítě, proto byly jednotlivé úseky napájeny z různých fází. To vyžaduje rozdělit trakční vedení do kratších úseků, navzájem oddělených neutrálními poli a napájené z různých fází. Toto způsobuje problémy při rekuperačním brzdění, návrat energie do veřejné sítě je nevýhodný, dodavatelé elektrické energie se mu brání z ekonomických i technických důvodů (nárazové dodávky, nízký účinek, deformovaný průběh napětí a proudu), a jiné vozidlo, které odebere dodanou energii, nemusí být v daném úseku k dispozici.

Starší jednofázová vozidla se stejnosměrnými trakčními motory odebírají nikoliv sinusový, ale přibližně obdélníkový proud, který je navíc vlivem indukčnosti fázově posunut. Tím by byla distribuční síť zatěžována vyššími harmonickými složkami proudu (deformačním výkonem) a magnetizačním proudem (jalový výkon). V zájmu dodržení kritérií kvality odběru energie z distribuční sítě je nutno zajistit kompenzaci fázového posunu odebíraného napětí a proudu ze sítě pomocí tzv. filtračně kompenzační stanice (FKZ). Trakční napájecí stanice je připojena jen na jedno sdružené

napětí. I prostá činná zátěž způsobuje při takovém připojení fázové posuny proudů vůči fázovým napětím o $\pm 30^\circ$. Přívodním třífázovým vedením mohou cirkulovat jalové i činné výkony. Nesymetrická zátěž má pulzující charakter a současně deformuje kruhové pole ve strojích připojených k síti. Z důvodu různých napětí v připojovacích bodech k distribuční síti 110 kV je v ČR používáno výhradně jednostranné napájení trakčního vedení. To zvyšuje počet míst střídání fází v trakčním vedení na dvojnásobek (u napájecích stanic i uprostřed mezi nimi), což komplikuje trakční vedení i provoz vozidel.

Střídání fází je pro provoz vlakové dopravy nežádoucí. Mezi dvěma trolejovými dráty dvou různých fází je jmenovité efektivní napětí 43 kV. V místě styku dvou fází je proto vloženo neutrální pole. Toto neutrální pole mohou elektrická trakční vozidla přejíždět se zvednutým sběračem (je mechanicky sjízdné), ale s vypnutým odběrem proudu. Při odběru proudu by totiž mohlo dojít k natažení oblouku mezi opouštěnou fází a neutrálním polem a následně (po propojení neutrálního pole sběračem s novou fází) k mezifázovému zkratu s destruktivními účinky. Periodické vypínání odběru proudu u každé napájecí stanice a uprostřed mezi napájecími stanicemi vede k nespojitému napájení, které má řadu negativních dopadů na provoz vlakové dopravy:

- přerušení tažné síly,
- přerušení rekuperačního brzdění,
- přerušení chodu kompresoru,
- přerušení napájení AC palubních sítí,
- přerušení přímého napájení DC palubních sítí a dobíjení akumulátorů,
- přerušení činnosti vytápění a chlazení u klimatizačních agregátů,
- přerušení chodu respektive reset kuchyňských zařízení,
- snížení rychlosti v obloucích u vozidel s aktivním naklápěním (v důsledku jeho nefunkčnosti při poklesu tlaku vzduchu pro aktivní příčné vypružení)

S rostoucí rychlostí jízdy problém narůstá. Při vzdálenosti napájecích stanic 48 km jsou místa střídání fází vzdálena 24 km. Při rychlosti 60 km/h ujede vlak vzdálenost mezi nimi za 24 minut, při rychlosti 120 km/h za 12 minut a při rychlosti 160 km/h za 9 minut.

Proto byla hledána technická řešení jak přepnout neutrální pole v okamžiku jeho obsazení sběračem vlaku z napětí jedné fáze na druhou. Jde o obtížnou úlohu (na víc řešenou v obvodu s amplitudou napětí $1,1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 25 \text{ kV} = 67 \text{ kV}$), neboť zde působí závažné fyzikální jevy:

- současné zapnutí obou fází znamená mezifázový zkrat,
- vypnutí a nové zapnutí napětí fázového napětí s prodlevou vede v mezičase k aktivaci podpěťové ochrany na vozidle,
- vypnutí a nové zapnutí napětí bez prodlevy vede ke krátkodobému přesycování transformátoru, kdy složka magnetizačního proudu mnohanásobně vyroste. Na tento jev jsou

náchylné zejména transformátory starších elektrických lokomotiv. Pro jeho eliminaci jsou tyto lokomotivy již od výroby připojovány na napětí nikoliv zapnutím hlavního vypínače, ale zvednutím sběrače. Tím bylo docíleno sepnutí proudového okruhu přeskokem v okamžiku plné amplitudy napětí, což je provázeno charakteristickým prsknutím. Jakékoliv vnější spínání tento princip neutralizuje.

Provozní zkoušky automaticky přepínaného neutrálního pole ve spínací stanici Popice potvrdily nesnadnost tohoto tématu. Avšak ani případné vyřešení této úlohy neřeší základní téma. Sice by vytvořilo spojitě napájení vlaků, ale třífázová distribuční síť 3 x 110 kV 50 Hz by byla i nadále zatěžována nesymetrickým odběrem proudu, požadavky PNE 33 34 30-0 (nesymetrie nejvýše 0,7 %, tedy zatěžování výkonem do nejvýše 0,7 % zkratového výkonu) by nebyly splněny.

Filtračně kompenzační stanice (FKZ).

FKZ nejsou levnou záležitostí, výrazně zvyšují náklady na výstavbu a provoz trakčních transformoven. Za zmínku stojí i ztráty energie v FKZ které dosahují kolem 2 % a jsou tak zcela srovnatelné se ztrátami v trakčním vedení, které též dosahují kolem 2 %. Soudobá trakční vozidla již nepoužívají můstkové (diodové či tyristorové) usměrňovače, ale vstupní čtyřkvadrantové měniče. Neodebírají ani jalový proud, ani proudy vyšších harmonických složek. To má zásadní vliv nejen na zásadní pokles ztrát v trakčním vedení (ty závisí na druhé mocnině reciproké hodnoty účinníku), ale i na nepotřebnost filtrace a kompenzace. Soudobá vozidla, kterých je na tratích SŽDC stále více (aktuálně již cca 200) tedy nepotřebují FKZ. Existence FKZ v trakčních transformovnách napájejících tratě, na kterých jsou používána soudobá vozidla se vstupními čtyřkvadrantovými měniči je, problematická nejen z důvodu zbytečných ztrát v pevných trakčních zařízeních (prakticky zdvojnásobení), ale i z důvodů rizika poškození FKZ. Tato zařízení byla v minulosti navrhována pro zatěžování vozidla s můstkovými usměrňovači (diodovými či tyristorovými), nikoliv pro zatěžování soudobými vozidly se vstupními čtyřkvadrantovými měniči. Při jejich napájení mohou vznikat rezonanční jevy, které mohou vést k vážnému poškození FKZ, což již se opakovaně stalo. Ukazuje se proto rozumné sledovat dlouhodobý vývoj na straně struktury vozidel používaných k dopravě vlaků na příslušné trati. Při převažujícím počtu soudobých vozidel se vstupními čtyřkvadrantovými měniči nad staršími vozidly s můstkovými usměrňovači se jeví vhodnější odstavit FKZ z provozu neboť jejich negativní přínosy převáží nad pozitivními..

1.2.1.3 25 kV, 50 Hz systém jednotné fáze

Soudobá trakční vozidla se střídavými frekvenčně řízenými trakčními i pomocnými pohony jsou vybaveny vstupními čtyřkvadrantovými měniči. Díky tomu odebírají přibližně sinusový proud, který je ve fázi s napětím, tedy nezatěžují síť jalovým ani deformačním výkonem, nepotřebují stacionární filtračně kompenzační zařízení. Moderní lokomotiva o výkonu 6 MW s AC trakčními motory s účinníkem cca 1 nepředstavuje pro pevná trakční zařízení větší zátěž, než starší lokomotiva o výkonu 4,2 MW s DC trakčními motory a tedy s účinníkem 0,7.

Zvyšování rychlosti jízdy vlaků a s ním spojený růst výkonů vozidel na straně jedné a vyšší nároky na kvalitu odběru energie z třífázové distribuční sítě na straně druhé vedou k nemožnosti připojovat jednoduše jednofázové trakční transformovny s obyčejnými transformátory s jednou fází nebo se dvěma fázemi zapojenými do V k distribuční síti 3 x 110 kV, toto bývalo v minulosti běžné. Ke splnění současného kritéria jednofázového či dvoufázového odběru do úrovně nejvýše 0,7 % zkratového výkonu by vyžadovalo k připojení napájecí stanice o výkonu 16 MVA v daném místě zkratový výkon distribuční sítě 2 286 MVA. Tak velkými zkratovými výkony běžné distribuční sítě 3 x 110 kV nedisponují.

Řešením je použití aktivních balancérů. Jde o vysokonapěťové vícehladinové mezifázové IGBT spínače, které jsou řízeny tak, aby část proudu z fáze, která přímo napájí trakční vedení (například R), byla převáděna do ostatních dvou fází (například S, T).

Přínosy použití balancerů jsou následující:

- možnost zavést (podobně jako v síti 15 kV) i v síti 25 kV systém jednotné fáze (například R – soufázové napájení) místo tradičního systému střídání tří fází R, S, T,
- možnost využívat balancer i ke kompenzaci jalového odběru,
- možnost využívat balancér ke stabilizaci napájecího napětí 25 kV při změnách napětí v síti 3 x 110 kV a díky tomu přejít dvoustranné, respektive spojitě napájení,
- zavedení dvoustranného, respektive spojitého napájení, systému 25 kV

1.2.1.4 2 x 25 kV, 50 Hz

Principiálně se jedná o vedení 25kV s pomocným vedením, které je zavěšeno na trakčních stožárech. Toto vedení (negativní napáječ) je napájeno opačným napětím, tedy střídavým napětím 25 kV, fázově posunutým o 180 ° vůči napětí v trolejového drátu (též bývá nazýváno – 25 kV, respektive mínus 25 kV). Napájecí stanice jsou vybaveny transformátory vvn / 50kV, jejichž jeden konec vinutí je připevněn na trakční vedení a druhý na pomocné vedení. Střed vinutí je propojen s traťovou kolejnicí. Na každých asi 15 km napájecího úseku jsou instalovány autotransformátory 50/25kV, jejichž konce vinutí jsou připojeny na trakční vedení a střed vinutí na kolejnici. Souběžný vodič a trakční vodiče jsou připojeny na opačné fáze trakčního transformátoru a proti kolejnici mají potenciál 25kV. Vůči vozidlům se proto chová systém 2 x 25 kV stejně jako tradiční obyčejný systém 1 x 25 kV (je s nimi plně kompatibilní), avšak k přenosu energie mezi napájecí stanicí a místem na trati využívá napětí 50 kV. Přenos el. energie, který se uskutečňuje při napětí 50kV umožní (při zachování stejných poměrných úbytků napětí jako při jednoduchém systému 25kV) prodloužit vzdálenost trakčních napájecích stanic. Teoreticky dochází ke zvýšení přenosové schopnosti trakčního vedení (ve smyslu vztahu: $p = \Delta P / P = RI^2 / UI = R \cdot P / U^2 = r \cdot L \cdot P / U^2$) na čtyřnásobek (dvojnásobné napětí a poloviční proud). Autotransformátory se však neinstalují blízko sebe, v praxi se proto využívá prodloužení na 2,5 násobek oproti tradičnímu obyčejnému systému 25kV.

1.2.2 Soustava stejnosměrná.

Stejnosemřná soustava je charakterizována především tím, že napájecí stanice (trakční měnirny – TM) dodávají do trakčního vedení přímo usměřněný proud. To bylo výhodné v době, kdy vozidla využívala stejnosměrné trakční motory, což se postupně stává minulostí – trakční vozidla v celém spektru svých aplikací přecházejí na střídavé frekvenčně řízené trakční a pomocné pohony.

Nevýhodou stejnosměrných systémů je absence transformátoru, tedy orientace na nepřilíš vysoké napětí a tedy i velké proudy, přenosová schopnost vedení ($p = \Delta P / P = R I^2 / U I = R \cdot P / U^2 = r \cdot L \cdot P / U^2$) je nízká a ztráty velmi velké. To se zotrřuje s růstem výkonů vozidel a se zkracováním intervalů mezi vlaky – účinnost vedení klesá lineárně s růstem výkonů.

Nízká přenosová schopnost trakčního vedení brání nejen zvyšování výkonů vozidel, ale i efektivnímu využití rekuperačního brzdění. Vozidla jsou si schopna předávat energii jen na dosti malou vzdálenost a běžné (diodové) měnirny neumí předat přebytečnou energii zpět do distribuční sítě.

Zdokonalováním konstrukce trakčních motorů se postupně přešlo z nižších napětí až na 3kV. Zvyšování napětí sledovalo možnost snížit vodivý průřez trakčního vedení, zmenšit ztráty ve stejnosměrném rozvodu, a tedy zvětšit vzdálenosti napájecích bodů. Avšak s příchodem výkonnějších vozidel nastal trend opačný – zvyšování vodivého průřezu zesilovacím vedení a snižování vzdálenosti napájecích stanic vkládáním dalších měniren.

Další nevýhodou stejnosměrných systémů jsou škodlivé bludné proudy (zemí) a podélné proudy (vozidly), které poškozují kovové konstrukce. Ochranná opatření k omezení jejich vzniku neumožňují kolejiště uzemnit, což má zásadní negativní vlivy na řešení ochrany před dotykem kolejnic i neživých částí v sítích 3 x 400 V / 230 V i v řešení ochrany proti zásahu blesku do kolejnic i v řešení bl eskosvodů na okolních objektech.

V současnosti z železnic stejnosměrné systémy postupně programově mizí. Doménou aplikace stejnosměrných systémů zůstává městská doprava, a to z bezpečnostních důvodů a pro malé vzdálenosti, na kterých jsou městské systémy provozovány.

1.2.2.1 600 V stejnosměrných

Tato soustava se využívá především pro městské tramvajové systémy a pro trolejbusy (dvoustopé vedení). Navzdory nízkému výkonu vozidel bývá vzdálenost měniren jen cca 3 až 5 km.

1.2.2.2 750 V stejnosměrných

Tato soustava se využívá především pro metro (přívodní kolejnice), městské tramvajové systémy a pro trolejbusy (dvoustopé vedení). U systémů metra je s ohledem na vyšší výkony vzdálenost měniren jen 1 až 2 km (jsou téměř v každé stanici). Anachronismem je použití tohoto systému na příměstských železnicích na jih od Londýna.

1.2.2.3 1,5 kV stejnosměrné

Napětí této soustavy bylo dáno nižší úrovní elektrotechniky v některých zemích počátků rozmachu elektrizace železnic, t. j. přibližně v období mezi světovými válkami. V zemích, kde je tato soustava rozšířená (Francie a Holandsko), přináší problémy – i přesto, že se na hlavních kolejích používají zdvojené trolejové dráty a přídavné nosné lano (vodivý průřez přes 1 000 mm²) i velmi malá vzdálenost měníren, není tato soustava schopná již zvládat výkony dnes požadované. Moderní vícesystémová vozidla na ni vesměs pracují výrazně sníženým výkonem (ve srovnání se systémy 3, 15 a 25 kV zhruba polovičními). Zejména při budování vysokorychlostních železnic je nahrazována systémem 25 kV. Na našem území je takto elektrizována trať Tábor–Bechyně.

1.2.2.4 3 kV stejnosměrné

Napětí 3 000 V představuje prakticky hranici stejnosměrné soustavy, vyšší napětí by bylo obtížně zvládnutelné jak z hlediska izolačního stavu trakčního obvodu včetně motorů, tak i napětí mezi lamelami komutátorů trakčních motorů. Výhodou tohoto systému bývala jednoduchost vozidel, ta však pominula koncem minulého století s příchodem vozidel s technikou střídavých trakčních a pomocných pohonů. K nevýhodám patří vysoké ztráty ve vedení a jeho nízká přenosová schopnost, která brání využít plný výkon současných vozidel a omezuje použití rekuperačního brzdění. Problematické jsou zejména velké železniční stanice, ve kterých se často rozjíždějí vlaky a přitom jsou hodně vzdáleny od měníren (Pardubice, Olomouc, ...). Dále je zde omezení přenášeného výkonu limitem proudu, který je schopná tato soustava přenést k vozidlu a přes sběrač na vozidlo. Vyžaduje na zatížených tratích v ČR až 510 mm² průřezu měděných vodičů (trolejový drát 150 mm² Cu, nosné lano 120 mm² Cu, zesilovací vedení 2 x 120 mm² Cu), a trakční měnírny v průměrných vzdálenostech 20 km. U této soustavy je nutné zabezpečit ochranu kovových prvků v okolí tratě před účinky bludných proudů. Průřez trolejového drátu je proti střídavé soustavě větší, avšak ani tak není schopná přenést srovnatelný výkon.

Porovnání různých systémů napájení drah	Systém					
	DC	DC zes	AC			
	3 kV	3 kV	25 kV 50Hz	25 kV R	25 kV R stab	2x25 kV 50Hz Rstab
ztráty ve vedení při odběru proudu (100 % = příkon DC vozidla)	22,0%	10,0%	1,5%	1,5%	1,0%	0,5%
ztráty ve vedení při rekuperaci	2,0%	0,5%	0,5%	0,5%	0,3%	0,2%
ztráty v brzdových odporcích	11,0%	20,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ztráty v transformátoru	0,0%	0,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%
ztráty celkem	35,0%	30,5%	7,0%	7,0%	6,3%	5,7%
možnost uzemnění kolejnic	ne	ne	ano	ano	ano	ano
poškození konstrukcí v zemi bludnými proudy	ano	ano	ne	ne	ne	ne
poškození vozidel podélnými proudy	ano	ano	ne	ne	ne	ne
přenosová schopnost vedení	nízká	nízká	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká
následné mezidobí	velké	velké	malé	malé	malé	malé
limitní vzdálenost napájecích stanic	cca 25 km	cca 12 km	cca 45 km	cca 60 km	cca 60 km	cca 80 km
symetrický odběr z 3 AC distribuční sítě	ano	ano	ne	ano	ano	ano
potřebný zkratový výkon 3 AC distribuční sítě z hlediska nesymetrie	ne	ne	1 až 2 GVA	ne	ne	ne
možnost rekuperace do 3 AC distribuční sítě	ne	ne	ano	ano	ano	ano
vzdálenost možné rekuperace mezi vozidly	omezena	velmi omezena	22 km	60 km	neomezena	neomezena
spojité napájení trakčního vedení	ano	ano	ne	ano	ano	ano
dvoustranné napájení trakčního vedení	ano	ano	ne	ne	ano	ano
omezení napáječových proudů zkratovými poměry v trakční síti	ano	ano	ne	ne	ne	ne
možnost hvězdicovitého napájení	ano	ano	ne	ano	ano	ano
nutnost neutrálního pole v trakčním vedení u napájecích stanic	ne	ne	ano	ne	ne	ne
nutnost neutrálního pole v trakčním vedení uprostřed mezi nap. st.	ne	ne	ano	ano	ne	ne
nutnost vypínání proudu vlaku u napájecích stanic	ne	ne	ano	ne	ne	ne
nutnost vypínání proudu vlaku uprostřed mezi napájecími stanicemi	ne	ne	ano	ne	ne	ne
možnost stabilizace výstupního napětí napájecí stanice	ne	ne	ne	ano	ano	ano
možnost řízeného rozmrazování trakčního vedení vyrov. proudy	ne	ne	ne	ne	ano	ano