

Pohonné a napájecí systémy pro elektromobilitu

Elektrické trakční systémy
kolejových vozidel

Studijní materiál

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.



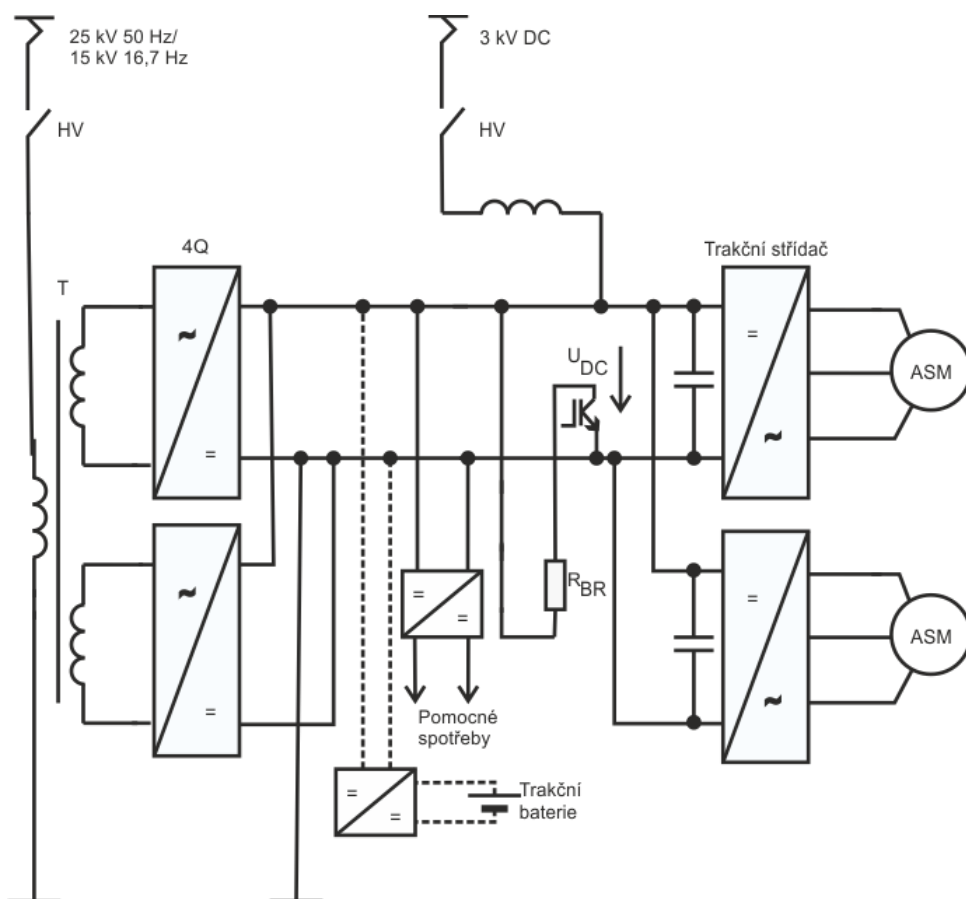
Elektrické trakční systémy kolejových vozidel

Kolejová doprava zaujímá v systémech udržitelné mobility významné místo. Její výhody jsou především energetická hospodárnost daná nižšími jízdními odpory vlakových souprav (valivý odpor kola po kolejnici je až 8x nižší oproti valivému odporu pneumatiky po vozovce, je nižší měrný odpor vzduchu – čelo dlouhé soupravy má ve výsledku menší aerodynamický odpor než např. součet aerodynamických odporů konvoje kamionů přepravujících stejný náklad), velká přepravní kapacita, vyšší bezpečnost provozu a malé nároky na plochu kapacitní drážní komunikace ve srovnání s nároky na plochu u dálničních komunikací. Přehled o měrné energetické náročnosti různých dopravních prostředků v osobní dopravě dává Tab. 1.

U moderních železničních hnacích vozidel pro evropský region se relativně ustálila struktura elektrické trakční výzbroje. Příklad koncepce elektrické výzbroje takového vozidla je na obr. 1. Jedná se kmenově o koncepci moderních lokomotiv s výkony v okolí 6 MW pro mezinárodní provoz pro osobní i nákladní dopravu – obr. 2 a), b). Obdobnou koncepcí elektrické výzbroje se vyznačují i elektrické jednotky pro regionální dopravu, kde je výzbroj dimenzovaná na nižší výkony (zpravidla přibližně na 1 MW na jeden vůz) a je zpravidla koncipovaná pro provoz na jednom nebo dvou napájecích systémech. Společným znakem moderních železničních hnacích vozidel je individuální pohon dvojkolí asynchronním trakčním motorem. Lokomotivy s výkonem v okolí 6 MW jsou typicky čtyřnápravové (dva dvounápravové podvozky) s individuálním pohonem všech náprav, elektrické jednotky se vyznačují také využitím dvounápravových podvozků s individuálně poháněnými nápravami buď v uspořádání 1 vůz = 2x dvounápravový podvozek (obr. 3 a)) nebo je použita koncepce, kdy jeden dvounápravový podvozek nese společně dva sousední vozy (tzv. Jacobsovo uspořádání – obr. 3 b)). U železničních jednotek pro regionální dopravu nejsou v řadě případů vybaveny trakčními pohony všechny podvozky, ale například jen poloviční počet podvozků.

Vozidlo	Osobní automobil/ elektromobil	Autobus/ elektrobus	Tramvaj	Elektrický regionální vlak	Elektrický dálkový vlak
Měrná energetická spotřeba (Wh/km/t)	100 až 200	90 až 120	40 až 70	35 až 50	25 až 35

Tab. 1 Měrná energetická spotřeba vozidel pro osobní dopravu, u vozidel se spalovacími motory není zahrnuta energie ztrátového tepla



Obr. 1 Bloková struktura elektrické výzbroje moderní čtyřnápravové elektrické lokomotivy – na obrázku je znázorněna část elektrovýzbroje připadající na jeden podvozek (dva trakční motory)



a)

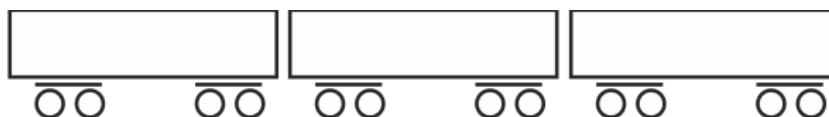


b)

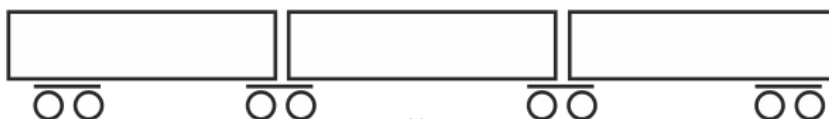


c)

Obr. 2 Moderní železniční elektrická vozidla: a) elektrická třísystémová lokomotiva ŠKODA řady 380, b) elektrická třísystémová elektrická lokomotiva SIEMENS Vectron, c) dvousystémová elektrická jednotka pro regionální dopravu ŠKODA řady 650



a)



b)

Obr. 3 Možná uspořádání pojezdu u jednotek pro regionální osobní dopravu

Na obr. 1 je blokově znázorněna koncepce elektrické výzbroje moderní třísystémové elektrické lokomotivy pro mezinárodní provoz, resp. jedná se o zapojení trakčního obvodu pro dva pohony jednoho podvozku. Pro druhý podvozek je schéma elektrické výzbroje identické. Lokomotiva je určena pro tři nejpoužívanější drážní napájecí systémy v Evropě: 25 kV 50 Hz (např. ČR – část, Maďarsko, Bulharsko, Francie – část), 15 kV 16,7 Hz (např. Německo, Rakousko, Švýcarsko) a 3 kV stejnosměrné (např. ČR – část, Polsko, Itálie). Z uvedených soustav je pro budoucnost jako perspektivní uvažována soustava 25 kV 50 Hz vzhledem k vysoké přenosové schopnosti, vyšší účinnosti přenosu elektrické energie (97 až 99%) a vzhledem k možnosti instalace menšího počtu napájecích stanic.

Při provozu lokomotivy na soustavě 25 kV 50 Hz nebo 15 kV 16,7 Hz je výkon přenášen ze sběrače přes hlavní vypínač HV na primární vinutí trakčního transformátoru T. Druhý konec vinutí transformátoru je vodivě propojen s koly a kolejnicemi pro odvod zpětného proudu kolejnicovými pásy. V závislosti na připojeném napájecím systému 15 kV/25 kV je napájena příslušná odbočka primárního vinutí trakčního transformátoru upravující převod transformátoru tak, aby bylo sekundární napětí totožné, nezávislé na připojené napájecí soustavě. Sekundární vinutí trakčního transformátoru napájí paralelně pracující tranzistorové usměrňovače 4Q, které umožňují průchod výkonu v obou směrech, umožňují tedy rekuperaci výkonu do napájecí soustavy v případě generátorického brzdění pohonů lokomotivy. Usměrňovače napájí centrální energetický uzel trakční výzbroje – stejnosměrný meziobvod. Napětí tohoto meziobvodu je v řadě případů nastaveno na 3 kV. V případě provozu lokomotivy na systému 3 kV stejnosměrných je stejnosměrný meziobvod napájen přímo trolejovým napětím přes hlavní vypínač HV a filtrační cívku. Záporný pól stejnosměrného meziobvodu je v tomto případě spojen s koly a kolejnicemi pro odvod zpětného proudu. V případě, že se jedná o lokomotivu pouze pro střídavé napájení přes trakční transformátor, není přímé trolejové napájení stejnosměrného meziobvodu instalováno a napětí stejnosměrného meziobvodu bývá nižší, zpravidla v rozsahu 1000 až 2000 V.

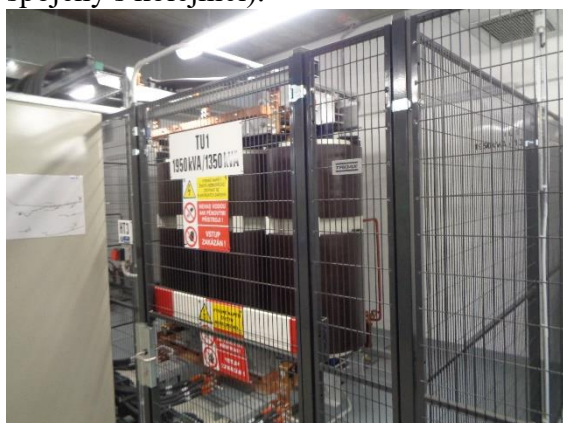
Ze stejnosměrného meziobvodu jsou napájeny trakční měniče – střídače, které řídí napájecí frekvenci pro frekvenčně řízené asynchronní trakční motory na každém dvojkolí. Formování výstupního napětí a proudu střídačů se uskutečňuje pomocí šířkově pulsní modulační, jak bylo popsáno v předcházejících kapitolách. V obr. 1 je ve stejnosměrném meziobvodu znázorněno připojení brzdového odporu R_{BR} přes tranzistor. V brzdovém odporu se maří na teplo brzdí energie vozidla v případě, že napájecí síť není schopna přijmout brzdí výkon elektrické brzdy, což je v některých situacích případ stejnosměrné napájecí soustavy 3 kV. Brzdovými odporníky se v současnosti již nevybavují vozidla určená výhradně pro provoz na střídavé napájecí soustavě, kde se předpokládá rekuperace veškeré brzdí energie do napájecí sítě.

Ze stejnosměrného meziobvodu je dále napájen stejnosměrný, galvanicky oddělený, měnič pro pomocné spotřeby, který napájí síť pomocných spotřeb, zpravidla se stejnosměrným napětím 600 V. U některých typů lokomotiv se však používá střídavá třífázová síť pomocných spotřeb 3x400 V 50 Hz. Ze sítě pomocných spotřeb se napájí veškeré pomocné obvody, tedy například topení, klimatizace, pomocné pohony kompresoru, ventilátorů, čerpadel vodních chladicích okruhů měničů, osvětlení řídicí a zabezpečovací systémy atd.

Pro napájení vozidel vlakové soupravy z lokomotivy se používají vlakové silové sběrnice s napětími 3 kV DC, 1500 V 50 Hz, 1500 V DC nebo 1000 V 16,7 Hz. Na každém voze soupravy je pak instalován centrální zdroj energie, který vytvoří z napětí silové vlakové sběrnice všechna potřebná napětí pro napájení spotřebičů ve voze (osvětlení, topení, klimatizace, zásuvky, řídicí a informační systémy). Celkové příkony spotřebičů ve vozech jsou poměrně vysoké a na jeden vůz dosahují hodnot až přes 50 kW. Příkony pomocných spotřeb na hnacích vozidlech jsou ještě vyšší, až 70 kW na lokomotivu.

V současnosti se začíná v regionální osobní dopravě rozšiřovat použití elektrických jednotek s pomocným akumulátorovým napájením, jedná se o analogii parciálních trolejbusů, kdy se při jízdě na elektrifikované trati nabíjejí trakční akumulátory a na neelektrifikované trati je energie z těchto akumulátorů odebírána. V železniční technice se pro tyto účely používají téměř výhradně akumulátory s technologií článků LTO, především z důvodu jejich velké životnosti a velké výkonové zatížitelnosti. Kapacita akumulátorových baterií se na těchto vozidlech pohybuje v rozmezí 500 až 800 kWh, což umožňuje dojezd dvouvozové jednotky 80 až 100 km s akumulátorovým napájením. Tento relativně krátký dojezd s akumulátorovým napájením je v evropských železničních podmínkách dostačující vzhledem k velké míře elektrifikace tratí. Na obr. 1 je znázorněno připojení akumulátorové baterie v takovémto vozidle do stejnosměrného meziobvodu přes přizpůsobovací stejnosměrný měnič – připojení je naznačeno čárkovaně. V ČR jsou tyto jednotky provozovány s možností napájení ze soustavy 3 kV stejnosměrných nebo 25 kV 50 Hz.

Kolejové dráhy MHD jsou napájeny stejnosměrným napětím. Jmenovité napájecí napětí tramvajových tratí je 600 V nebo 750 V. Infrastruktura pro napájení tramvajových drah se v některých případech s výhodou propojuje s infrastrukturou pro trolejbusové trati. Oba systémy jsou v tom případě napájeny ze společného transformátoru (obr. 4), tramvajová a trolejbusová trať má však galvanicky oddělená sekundární vinutí a usměrňovače, neboť trolejbusová napájecí soustava je izolovaná, ale při napájení tramvajové trati je jeden pól na výstupu usměrňovače spojen s kolejnicí pro vedení zpětného proudu (zpravidla záporný pól je spojený s kolejnicí).



a)



b)

Obr. 4 Společná napájecí stanice pro trolejbusovou a tramvajovou trať – napájecí transformátor s oddělenými sekundárními vinutími (22 kV/650 V v případě napětí troleje 750 V a 22 kV/520 V v případě napětí troleje 600 V – obr. a)) a pohled do napájecí stanice s usměrňovacími, spínacími a jisticími moduly (obr. b))

U tratí metra a městských rychlodrah je napájecí napětí 750 V nebo v zahraničí u nových drah 1500 V.

Vzhledem ke stejnosměrnému napájení s napětím pod 1000 V (nízké napětí) je trakční výzbroj tramvajů, vozů metra a vozů městských rychlodrah jednodušší a vzhledem k absenci trakčního transformátoru i výrazně lehčí ve srovnání se železničními vozidly pro střídavé napájecí soustavy. Napětí trolejového vedení je ve vozidlech přivedeno přes jisticí, spínací a filtrační komponenty přímo na stejnosměrnou trakční sběrnici, jejíž napětí je tím pádem rovno napětí trolejovému. Ze stejnosměrné trakční sběrnice jsou přes pomocné měniče napájeny pomocné spotřebiče, dále jsou ze stejnosměrné trakční sběrnice napájeny vstupní obvody paralelně řazených trakčních střídačů pro napájení trakčních motorů. U moderních kolejových vozidel MHD se používají výhradně střídavé třífázové trakční motory asynchronní nebo synchronní s permanentními magnety. V případě použití asynchronních trakčních motorů jsou

v některých případech napájeny dvojice paralelně řazených trakčních motorů ze společného střídače, v případě synchronních motorů s permanentními magnety musí být každý trakční motor napájen individuálně z vlastního střídače. U kolejových vozidel MHD se uplatňují individuální pohony dvojkolí jednotlivými trakčními motory, v některých případech i individuální pohony jednotlivých kol. V řadě aplikací kolejových vozidel pro MHD se rozšiřuje použití synchronních motorů s permanentními magnety z důvodu jejich malého objemu a lepší účinnosti. U některých kolejových vozidel MHD se používají pomaluběžné vysokomomentové synchronní motory s permanentními magnety s přímým bezpřevodovkovým pohonem kol nebo náprav.

Celkové výkony trakčních pohonů tramvajových vozidel se v závislosti na jejich velikosti a charakteru provozu pohybují v řádech stovek kW, u vozidel metra a vozidel městských rychlodrah dosahují celkové výkony trakčních pohonů řádově nižších jednotek MW.

Na obr. 5 je příklad provedení moderního článkového plně nízkopodlažního tramvajového vozidla ŠKODA 15T s individuálními bezpřevodovkovými pohony jednotlivých kol šestnácti synchronními trakčními motory s permanentními magnety.



Obr. 5 Tramvaj ŠKODA 15T se šestnácti trakčními synchronními trakčními motory s permanentními magnety, jmenovitý výkon jednoho motoru je 46 kW

Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Pohonné a napájecí systémy pro elektromobilitu

Nabíjecí systémy pro elektrická
silniční vozidla

Studijní materiál

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.



Nabíjecí systémy pro elektrická silniční vozidla

Pro doplňování elektrické energie do akumulátorů v elektrických vozidlech je možno použít více principů:

- Kontaktní nabíjení přes kabelovou přípojku a nabíjecí konektor (obr. 1)
- Bezkontaktní (indukční) nabíjení - při stání vozidla nebo při jízdě po vozovce se speciální nabíjecí infrastrukturou
- Systémy výměny akumulátorů
- Nabíjení z troleje (nabíjecí nebo trolejbusová trolej)



Obr. 1 Kontaktní nabíjení elektrického silničního vozidla přes kabelovou přípojku a nabíjecí konektor, vpravo dole v kombinaci s fotovoltaickými zdroji na zastřešení parkoviště

Kontaktní nabíjení přes konektor je nejpoužívanější způsob u osobních a dodávkových elektrických automobilů, částečně je využíváno i u elektrobusů. Tomuto způsobu bude věnována pozornost v dalším textu.

Bezkontaktní nabíjení prostřednictvím induktivní vazby mezi primární částí nabíjecího transformátoru, který je součástí infrastruktury, a sekundární částí, která je na vozidle, není rozšířeno. Příčinou je komplikovanost technického řešení vlivem existence rozptylových magnetických polí, v případě systémů průběžného bezkontaktního nabíjení je problematická i velká komplikovanost a cena infrastrukturní části, která je zabudována do vozovky.

Systémy založené na výměně vybitých akumulátorů za nabitě se u elektrických vozidel rovněž běžně nevyužívají, neboť vyžadují komplikovanou manipulaci s akumulátory a především musí být na tento způsob doplňování energie připravena konstrukce vozidla. Většina výrobců elektrických vozidel nemá připravenou konstrukci vozidel na tento způsob doplňování energie.

Využívání nabíjení z troleje se významně rozšiřuje v oblasti elektrobusů a je standardem v případě parciálních trolejbusů. V případě elektrobusů jsou využívány krátké nabíjecí troleje, kde dochází k nabíjení ve stojícím stavu vozidla, doprava parciálními

trolejbusy s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru je velmi efektivní řešení, které využívá standardní trolejbusovou trolej a nabíjení se uskutečňuje ve velké míře při jízdě vozidla, nejsou zde tedy potřebné dodatečné časy pro nabíjení.

1 Nabíjecí systémy pro osobní a dodávkové elektrické automobily

Jak bylo uvedeno výše, pro nabíjení menších elektrických silničních vozidel lze rozlišit dva základní způsoby:

- **Nabíjení ze zdroje střídavého napětí** z jednofázové nebo z třífázové sítě (AC nabíjení), kdy se využívá palubní nabíječka ve vozidle
- **Nabíjení ze stejnosměrného zdroje napětí** (DC nabíjení), kdy se využívá externí nabíječka, jejíž výstupy jsou připojeny přímo na trakční baterii vozidla

Kontaktnímu nabíjení silničních vozidel pomocí nabíjecího kabelu s nabíjecím konektorem se věnuje soubor norem ČSN EN IEC 61851. V normě ČSN EN IEC 61851-1 ed.3 (Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením) jsou definovány hlavní požadavky na nabíjecí systémy (bezpečnostní otázky včetně požadavků na diagnostiku, prostředí, instalace, konstrukční otázky, požadavky na kabelovou sestavu, popis rozhraní, krytí, zkoušky) a jsou definovány základní **čtyři módy nabíjení elektrických vozidel**.

Mód nabíjení 1

Nabíjecí mód 1 předpokládá připojení vozidla ke standardizované zásuvce střídavé napájecí sítě pomocí kabelu a zástrčky, kde se nepředpokládá žádný řídicí signál. Mezní hodnota proudu při tomto módu nabíjení je 16 A, při jednofázovém nabíjení s napětím 230 V toto odpovídá meznímu výkonu 3,6 kW, při třífázovém nabíjení ze sítě 3x400 V toto odpovídá meznímu výkonu 11 kW. Při nabíjení v módu 1 musí být zajištěno bezpečné propojení vodiče PE sítě s neživou částí vozidla. Při nabíjení v módu 1 je využívána **palubní nabíječka vozidla**. V některých zemích je používání módu 1 zakázáno nebo je významně omezena maximální hodnota nabíjecího proudu.

Mód nabíjení 2

Mód 2 předpokládá použití speciálního nabíjecího kabelu pro nabíjení ze střídavé jednofázové nebo třífázové sítě. Při nabíjení v módu 2 se využívá **palubní nabíječka vozidla**. Nabíjecí kabel je opatřen **speciálním nabíjecím modulem**, který zajišťuje vybrané ochranné a diagnostické funkce a výměnu informací mezi nabíjecím modulem kabelu a palubní nabíječkou prostřednictvím řídicích signálů (obr. 2 a)). Mezní hodnota proudu při tomto módu nabíjení je 32 A, při jednofázovém nabíjení s napětím 230 V toto odpovídá meznímu výkonu 7 kW, při třífázovém nabíjení ze sítě 3x400 V toto odpovídá meznímu výkonu 22 kW. Při nabíjení v módu 2 musí být zajištěno **bezpečné propojení vodiče PE sítě s neživou částí vozidla**. Při nabíjení v módu 2 se musí použít **proudový chránič B**, který reaguje na střídavý i stejnosměrný unikající proud, případně se může použít běžný proudový chránič, který reaguje na střídavý unikající proud s doplněním o modul, který indikuje stejnosměrný unikající proud a může iniciovat vypnutí obvodu návazným kontaktním prvkem. Nabíjecí řetězec se na straně sítě jistí jističem třídy B.

Mód nabíjení 3

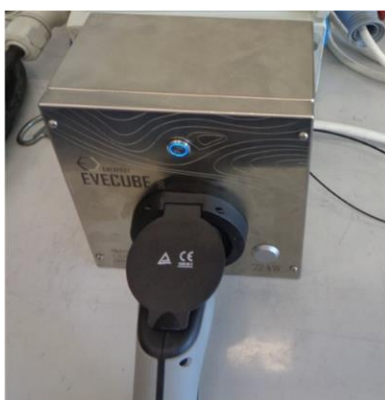
Při uplatnění módu 3 se předpokládá připojení vozidla k síti přes zařízení trvale připojené ke střídavé síti (tzv. **wallbox**, obr. 2 b), c)). Při nabíjení v módu 3 se využívá **palubní nabíječka vozidla**. Výměna informací mezi wallboxem a palubní nabíječkou se uskutečňuje prostřednictvím řídicích signálů. Mezní hodnota proudu při tomto módu nabíjení je 32 A, při jednofázovém nabíjení s napětím 230 V toto odpovídá meznímu výkonu 7 kW, při třífázovém

nabíjení ze sítě 3x400 V toto odpovídá meznímu výkonu 22 kW. Při nabíjení v módu 3 musí být zajištěno **bezpečné propojení vodiče PE sítě s neživou částí vozidla**. Požadavky na hlídání unikajícího proudu jsou zde stejné jako v případě módu 2. Nabíjení přes wallbox může být implementováno jako domácí systém nebo jako veřejná nabíječka. V případě skupiny více wallboxů v jedné lokalitě musí být každý wallbox samostatně jištěn. Wallboxy jsou dodávány řadou výrobců ve velkém množství typů. Jednotlivé typy se odlišují především strukturou vestavěných komponent. V maximální verzi může wallbox obsahovat následující komponenty:

- Silový spínač – při nepřipojeném vozidle nesmí být na vývodech wallboxu napětí
- Proudový chránič – indikace střídavých i stejnosměrných unikajících proudů
- Přepětová ochrana
- Oblouková ochrana – ochrana při vzniku elektrického oblouku v chráněném obvodu
- Nadproudová ochrana
- Filtř pro odstranění rušivých vlivů nabíjecího zařízení na napájecí síť
- Omezení nabíjecího proudu i v součinnosti s proudovým omezením objektu
- Obvody pro měření proudů, napětí, výkonů, energie, diagnostika, kontrola propojení ochranného vodiče
- Řídicí a komunikační obvody (komunikace s palubní nabíječkou a s obsluhou – prostřednictvím displeje, mobilního telefonu nebo sběrnice)
- Ovládání zámku při připojení nabíjecího kabelu k vozidlu – při nabíjení není možno kabel od vozidla odpojit
- Platební modul



a)



b)



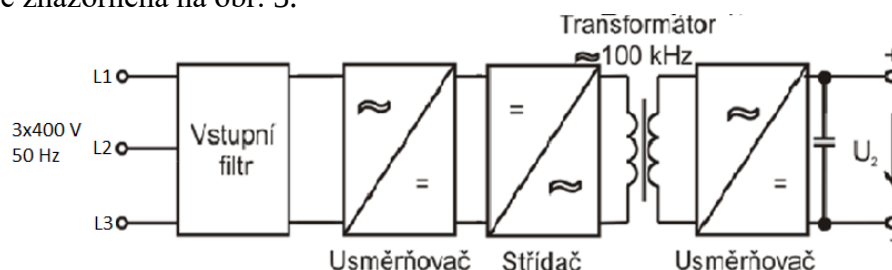
c)

Obr. 2 Příklady provedení nabíjecího kabelu s nabíjecím modulem (obr. a) - mód nabíjení 2) a wallboxů (obr. b) a c) – mód nabíjení 3)

Mód nabíjení 4

Jedná se o nabíjení stejnosměrným proudem s využitím externí nabíječky, která je součástí nabíjecí infrastruktury. Externí nabíječka je trvale připojena k napájecí síti a uplatnění tohoto systému je především ve veřejných nabíjecích stanicích. Externí nabíječky jsou standardně napájeny ze sítě 3x400 V, výstupní stejnosměrné napětí stejnosměrné nabíječky se přizpůsobí napětí trakční baterie vozidla. Při stejnosměrném nabíjení (DC nabíjení - **rychlónabíjení**) se pohybují nabíjecí výkony v rozmezí 50 kW až 350 kW. Nabíjení vysokými výkony v řádech stovek kW není zcela běžné a není ani technicky a

ekonomicky výhodné (snižování životnosti baterie, snižování účinnosti nabíjení, komplikované technické řešení, vysoké ceny energie za rezervovaný elektrický příkon). I při stejnosměrném nabíjení musí být bezpečně **propojen vodič PE elektrické sítě s neživou částí vozidla**, musí se hlídat střídavý i stejnosměrný unikající proud. Mezi batterymanagementem trakční baterie vozidla a externí stejnosměrnou nabíječkou se uskutečňuje datová komunikace. Při nabíjení trakční baterie vozidla ze stejnosměrné externí nabíječky se řídí velikost nabíjecího proudu a výkonu v návaznosti na okamžitý stav systému (teplota baterie, okamžitá hodnota SOC baterie, výkonová disponibilita napájecí sítě). Bloková struktura externích stejnosměrných nabíječek a palubních nabíječek ve vozidlech je analogická a je znázorněna na obr. 3.



Obr. 3 Bloková struktura nabíječky pro vozidlo

Vstupním obvodem nabíječky je vstupní filtr, jehož funkcí je odstínit rušivé vlivy elektronických obvodů nabíječky vůči napájecí elektrické síti. Následuje blok usměrňovače, který usměrní napětí střídavé napájecí sítě na stejnosměrné. V nabíječkách se nepoužívají jednoduché diodové usměrňovače, ale tzv. pulzní tranzistorové usměrňovače, které vykazují menší rušivé účinky na napájecí síť (téměř sinusový odebíraný proud, říditelný účinník). Výstupní napětí usměrňovače je následně střídačem převedeno na střídavé s frekvencí desítek až nižších stovek kHz. Použití této vysoké frekvence má zásadní dopad na výrazné snížení rozměrů a hmotnosti následujícího bloku – transformátoru – v souladu se skutečnostmi uvedenými v kapitole 8.1. Klíčovou funkcí transformátoru v nabíječce je galvanické oddělení střídavé napájecí sítě, která je uzemněná, od vozidlové trakční sítě, která je izolovaná. Napětí sekundární strany oddělovacího transformátoru je následně usměrněno a výstupní stejnosměrný proud, který je regulován ve zpětné vazbě, je přiveden na nabíjenou trakční baterii vozidla. Vozidlové nabíječky nejmodernějších typů elektromobilů jsou koncipovány pro řízený přenos výkonu v obou směrech, tj. od napájecí sítě do vozidla, ale i z vozidla do napájecí sítě. Toto uspořádání je přípravou na využití elektromobilů jako zásobníků energie pro energetickou síť v čase, kdy vozidlo není využíváno. Při tomto využití bude distributor energie poskytovat platby za poskytnutí vozidlové trakční baterie jako zásobníku pro vyrovnávání výkonové bilance v elektrické síti.

Externí stejnosměrná nabíječka obsahuje zejména tyto bloky:

- Vstupní vf filtr
- Vstupní usměrňovač
- Střídač
- Oddělovací transformátor (nutnost galvanického oddělení od napájecí sítě)
- Výstupní usměrňovač
- Spínací a jisticí prvky (stykač, pojistky, přepětové ochrany, proudový chránič)
- Řídicí jednotka
- Platební terminál
- Ovládací terminál
- Výstupní konektory
- Měřicí členy

Technické provedení systémů pro střídavé nabíjení

Střídavé (AC) pomalé nabíjení by mělo být základní formou pro nabíjení elektrických vozidel. Při střídavém nabíjení se zrovnoměrní zatížení elektrické sítě, je vyšší účinnost nabíjení, prodlužuje se životnost trakční vozidlové baterie a je příznivější cena za odebranou elektrickou energii. Při pomalém nočním střídavém nabíjení se zároveň významně zrovnoměrní odběrový diagram v elektrické síti v rámci celého dne, tj. eliminují se disproporce mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

Pro nabíjení elektrických vozidel obecně existuje několik připojovacích standardů. Uvedené standardy a provozní parametry těchto standardů jsou uvedeny v Tab. 1.

Typ	AC/DC	Napětí	Max. výkon	Max. proud
Mennekes	AC	230 V1f/400 V 3f	22 kW	32 A
CCS Combo 2	DC	200 až 920 V	350 kW	500 A
CHAdEMO	DC	500 V	60 kW	125 A
Tesla Connector	DC	480 V	145 kW	300 A

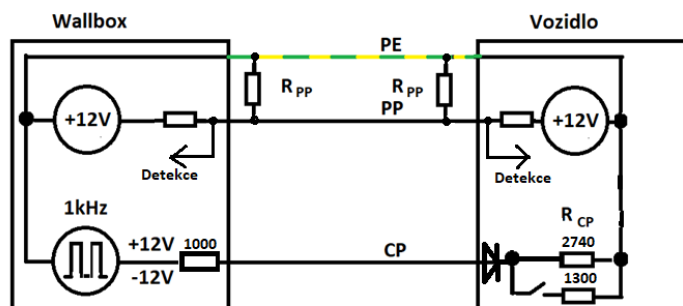
Tab. 1 Hlavní připojovací standardy pro nabíjení elektrických vozidel



Obr. 4 Příklad provedení nabíjecího stojanu s nabíjecími kabely pro připojovací standardy Mennekes (22 kW), CHAdEMO (50 kW) a CCS Combo 2 (50 kW)

Pro střídavé nabíjení v módu 2 a 3 se standardně využívá připojovací standard **Mennekes**. V současnosti se pro komunikaci mezi wallboxem v módu 3, resp. nabíjecím modulem kabelu v módu 2 a palubní nabíječkou vozidla používají běžně analogové signály, i když v legislativě je již i pro střídavé nabíjení v uvedených módech připravena struktura datové komunikace.

Signálové propojení mezi nabíjecím zařízením a vozidlem pro komunikaci na analogové úrovni v módu 2 a 3 je uvedeno na obr. 5.



Obr. 5 Signálové propojení pro AC nabíjení v módech 2 a 3

Při komunikaci mezi nabíjeným vozidlem a nabíjecím zařízením (wallboxem nebo nabíjecím modulem na nabíjecím kabelu) v analogové formě se využívají dva signály – **signál PP** a **signál CP**. Napětí vodičů se signály PP a CP je vztaženo vůči vodiči PE, tedy vůči ochrannému vodiči napájecí sítě TN-S. Využití vodiče PE v soustavě přenosu signálů PP a CP má zásadní význam pro bezpečnost nabíjení z hlediska ochrany proti úrazu elektrickým proudem – při poškození ochranného spojení mezi napájecí sítí a vozidlem, tj. při přerušení vodiče PE, je znemožněn přenos signálů PP a CP, tento stav je vyhodnocen řídicími obvody palubní nabíječky vozidla a stacionárního nabíjecího zařízení a nabíjení není umožněno.

Signál PP definuje maximální proud z hlediska dimenzování nabíjecího kabelu a indikuje připojení vozidla k nabíječce. V případě indikace připojení vozidla k nabíjecímu zařízení je zamezeno jakémukoli pohybu vozidla. Informace o maximálním proudu nabíjecího kabelu je zakódována prostřednictvím velikosti odporu R_{PP} připojeného mezi vodič PP a vodič PE. Velikost maximálního proudu nabíjecího kabelu je vázána na průřez použitých silových vodičů. Souvislosti mezi velikostí odporu R_{PP} , maximálním proudem kabelu a průřezem silových spojů v kabelu jsou uvedeny v Tab. 2.

Odpor	Max. proud	Průřez
1500Ω	13A	1.5 mm ²
680Ω	20A	2.5 mm ²
220Ω	32A	6 mm ²
100Ω	63A (3f) / 70A (1f)	16 mm ²

Tab. 2 Velikost odporu R_{PP} v relaci s maximálním proudem nabíjecího kabelu a s průřezem silových vodičů v nabíjecím kabelu

Signál CP definuje maximální nabíjecí proud z hlediska nabíjecího zařízení (wallboxu) a z hlediska dimenzování a jistění stacionárního elektrického přívodu. Dále signál CP nese informaci o **stavu nabíjecího procesu**. Uvedené informace jsou v signálu CP kódovány ve formě velikosti napěťové hladiny a ve formě poměrné doby spínání (střídý) signálu formovaného šířkově pulsní modulací. Pulsní signál CP je generován nabíjecím zařízením. Na straně vozidla je signál CP elektricky zatížen odporovým děličem a velikost napěťové úrovně signálu CP se šířkově pulsní modulací (PWM) je závislá na aktuálním zatěžovacím odporu signálu na straně vozidla. Tím vozidlo poskytuje nabíjecímu zařízení informaci o stavu nabíjecího procesu. V závislosti na stavu zatěžovacího odporu na straně vozidla lze podle velikosti napětí rozlišit tři stavy:

- 12V – signál CP generovaný nabíjecím zařízením není zatížen, není připojeno vozidlo

- 9 V – signál CP je zatížen rezistorem 2740 Ω – vozidlo je detekováno a nevyžaduje nabíjení
- 6 V – signál CP je zatížen rezistory 2740 Ω a 1300 Ω – proces nabíjení střídavým proudem

Informace o maximálním nabíjecím proudu nabíjecího zařízení pro palubní nabíječku vozidla je určena střídou (poměrnou šířkou) signálu δ podle Tab. 3.

Poměrná šířka δ_{PWM}	Max. nabíjecí proud
$\delta_{\text{PWM}} < 8\%$	Nabíjení zakázáno
$8\% \leq \delta_{\text{PWM}} < 10\%$	6A
$10\% \leq \delta_{\text{PWM}} \leq 85\%$	$\delta_{\text{PWM}} [\%] \times 0,6\text{A}$
$85\% < \delta_{\text{PWM}} \leq 96\%$	$(\delta_{\text{PWM}} [\%] - 64) \times 2,5\text{A}$
$96\% < \delta_{\text{PWM}} \leq 97\%$	80A
$\delta_{\text{PWM}} > 97\%$	Nabíjení zakázáno

Tab. 3 Kódování maximálního proudu nabíjecího zařízení střídou δ signálu CP

Na obr. 6 je příklad časového diagramu stavů nabíjení z hlediska průběhu napětí signálu CP. Jednotlivé časové intervaly na obr. 6 odpovídají následujícím stavům:

A – Vozidlo není připojeno k nabíjecí stanici, CP = 12 V DC

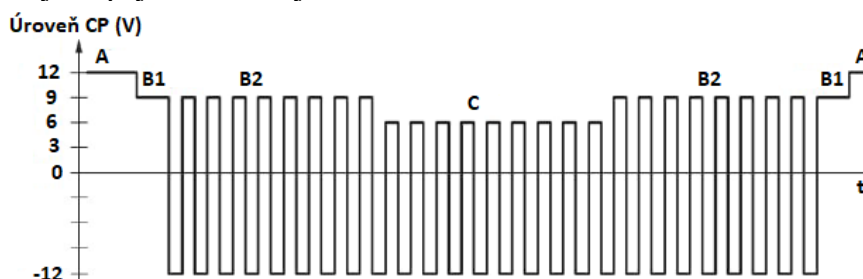
B1 – Vozidlo je připojeno k nabíjecí stanici, CP = 9 V DC

B2 – Nabíjecí stanice připravena k nabíjení, CP = 9 V PWM

C – Nabíjení vozidla, CP = 6 V PWM

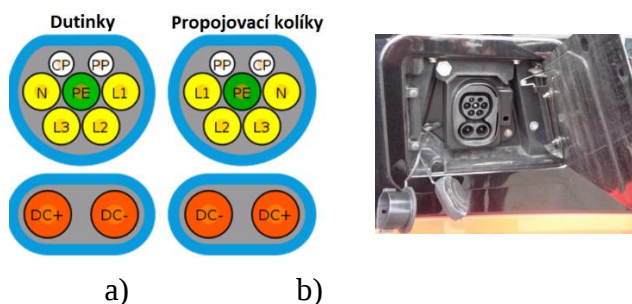
B1 – Nabíjení ukončeno, CP = 9 V DC

A – vozidlo je odpojeno od nabíjecí stanice, CP = 12 V DC



Obr. 6 Příklad časového diagramu nabíjení v profilu signálu CP

Na obr. 7 je znázorněno rozložení propojovacích pólů na standardním konektoru, který umožňuje **střídavé nabíjení ve standardu Mennekes** (módy 2 a 3) a **stejnoseměrné nabíjení ve standardu CCS2** (mód 4). Na uvedeném obrázku představují L1, L2 a L3 fázové vodiče, N je neutrální vodič, význam zbývajících propojení je zřejmý. Na obr. 7 a) je rozložení propojovacích pólů v případě dutinek (strana nabíjecího zařízení), na obr. 7 b) je rozložení propojovacích pólů v případě propojovacích kolíků (strana vozidla), na obr. 7 c) je provedení reálného nabíjecího konektoru na vozidle.



Obr. 7 Zapojení nabíjecího konektoru

Proces nabíjení je zabezpečen řadou bezpečnostních funkcí, například ochrana proti přerušení ochranného vodiče PE, ochrana při unikajícím střídavém nebo stejnosměrném proudu, elektromagnetický zámek konektoru jako ochrana proti rozpojení konektoru při nabíjení, ochrana proti připojení napětí na výstup nabíjecího kabelu bez připojeného vozidla.

Provoz elektrického automobilu je úzce svázán s efektivním hospodařením s energií. Tato skutečnost se pak projevuje především energetickými, environmentálními a ekonomickými benefity:

- Pro zásobování vozu energií lze ve významné míře využít obnovitelné, především fotovoltaické, zdroje s pozitivními dopady na ekonomiku provozu.
- Rekuperací v brzděném režimu se ušetří v průměru 25% energie v závislosti na podmínkách a charakteru jízdy.
- Některé typy elektrických vozidel jsou vybavovány systémem „Vehicle to load“, tj. vozidlo může posloužit jako kapacitní powerbanka pro vytvoření sítě 230 V 50 Hz pro napájení běžných spotřebičů.
- Nové typy vozů jsou připravovány na systém „Vehicle to grid“, jedná se o obousměrnou součinnost trakčního akumulátoru a distribuční energetické sítě, kdy v určitých obdobích nabídne vůz kapacitu trakční baterie jako úložiště pro přebytek energie v síti, distributor energie pak za tuto službu poskytuje majiteli vozu platbu.
- Provoz vozu je čistý a tichý, což je benefit především z hlediska lokálního znečištění ve velkých sídelních celcích.

2. Specifické nabíjecí systémy pro elektrobusey, parciální trolejbusy a elektrická vozidla pro nákladní dopravu

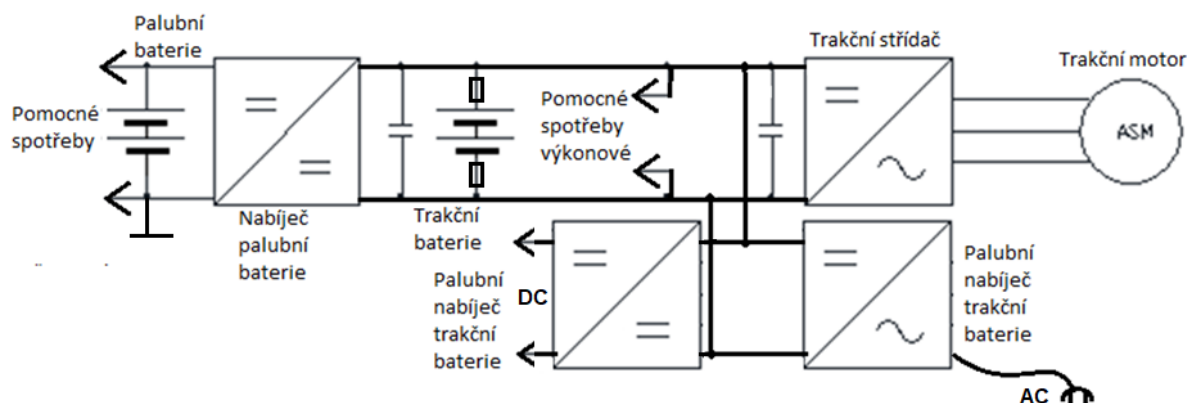
Elektrické pohony s akumulátorovým napájením se stále více uplatňují v elektrobusech a parciálních trolejbusech pro městskou hromadnou dopravu (MHD), výrobci vozidel rozšiřují i nabídku typů větších elektrických vozidel včetně tahačů kamionových návěsů, obr. 8.



Obr. 8 Příklady těžších elektrických silničních vozidel – elektrobuse SOR, parciální trolejbus Solaris/ŠKODA a tahač VOLVO.

Tato těžší vozidla se vyznačují vyššími výkony i specifickými podmínkami provozu včetně navazujících specifik konstrukce a dimenzování elektrické výzbroje. Návazně na tyto skutečnosti využívají uvedené skupiny vozidel některé specifické nabíjecí systémy a nabíjecí systémy pro elektrická osobní vozidla představené v předchozí kapitole slouží v některých případech velkých vozidel jen jako doplňková možnost nabíjení.

V oblasti výkonnějších silničních elektrických vozidel se v současnosti rozvíjí nejrychleji využití elektrobuseů a parciálních trolejbusů. Na obr. 9 je blokové schéma znázorňující nejobvyklejší koncepci elektrické výzbroje elektrobuseu.



Obr. 9 Koncepte elektrovýzbroje elektrobuseu

Stejně jako v případě osobního elektrického vozidla je v elektrobuseu centrálním energetickým uzlem stejnosměrná sběrnice, ve které je zapojena trakční akumulátorová baterie. Jmenovité napětí trakční baterie a stejnosměrné sběrnice elektrobuseů bývá v rozsahu 500 V až 800 V. Ze stejnosměrné sběrnice je napájen trakční pohon, který se skládá z trakčního střídače, asynchronního motoru, případně synchronního motoru s permanentními magnety a z nápravové převodovky téměř výhradně s pevným převodem. U elektrobuseů s vyšší kapacitou (délka 18 m nebo 24 m) se v některých případech používá dvojice trakčních motorů. Výkony trakčních motorů se u elektrobuseů pohybují v řádech nižších stovek kW. Ze stejnosměrné sběrnice jsou napájeny výkonné pomocné spotřebiče (pomocné pohony, topení klimatizace) a nabíječ pomocné palubní baterie. Pomocná palubní baterie je v elektrobusech zpravidla olověná s napětím 24 V. Z této baterie jsou napájeny pomocné spotřebiče s nižšími příkony (řídící a informační systémy, osvětlení).

Z hlediska kapacity trakční akumulátorové baterie a dimenzování nabíjecích systémů lze rozlišit dva základní přístupy vycházející ze způsobu doplňování energie ve vozidle. V ČR jsou obvyklé systémy elektrobuseů, kde jsou použity Li NMC nebo LFP baterie s kapacitami v rozsahu 150 až 300 kWh. Pro nabíjení se využívá palubní nabíječka pro stejnosměrné nabíjení, výkony těchto nabíječek se pohybují v řádech nižších stovek kW. Vozidlové stejnosměrné nabíječky v elektrobusech musí zajišťovat galvanické oddělení nabíjecí sítě a palubní síť vozidla. V dřívější době se pro nabíjení elektrobuseů využívaly nabíjecí konektory, vzhledem k obtížné manipulaci s těmito konektory se však v současnosti nejvíce rozšířilo nabíjení elektrobuseu pomocí střešního pantografu z dvojice speciálních nabíjecích trolejí, obdobných trolejím pro trolejbusy. Nabíjení elektrobuseů s popsanou koncepcí se předpokládá převážně v noci a na konečných zastávkách. Jako doplňkový způsob nabíjení se mnohdy na elektrobusey instaluje galvanicky oddělená palubní AC nabíječka s výkonem do 22 kW a konektorem Mennekes.

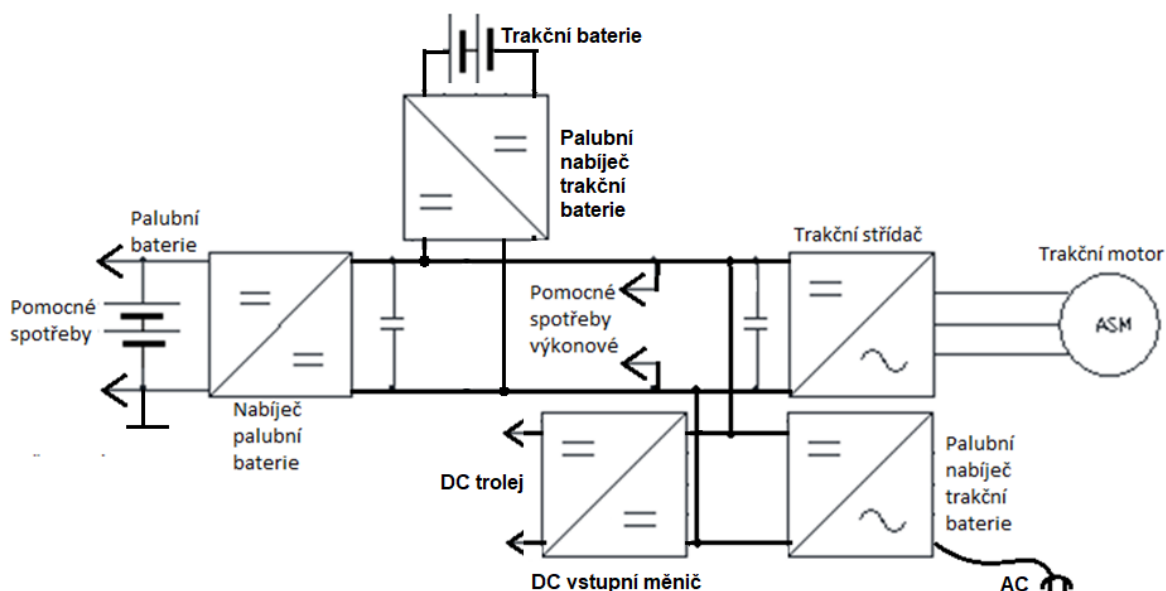
Druhý typ koncepce elektrobuseů, který se uplatňuje v některých provozech v zahraničí, využívá trakční akumulátorovou baterii s relativně malou kapacitou (40 až 100 kWh)

dimenzovanou na vybíjení a nabíjení vysokými výkony (5 až 8C) s technologií článků NMC HP nebo LTO. Nabíjení vozidla se uskutečňuje na vybraných zastávkách na trase linky pomocí speciálních nabíjecích rámců. Vzhledem k tomu, že se předpokládá nabíjení na zastávkách s dobou několika desítek s, pracuje se zde s vysokými nabíjecími výkony v řádech vyšších stovek kW. Krátkodobá nabíjení v zastávkách s vysokými výkony nelze realizovat s přímým odběrem z distribuční energetické sítě (vysoká výkonová maxima v krátkých časových intervalech). Z toho důvodu jsou nabíjecí stanice vybaveny energetickými mezizásobníky s průběžným nabíjením z distribuční sítě, které jsou schopny dodat krátkodobé špičkové nabíjecí výkony pro nabíjení vozidel v zastávkách. Tyto vysokovýkonné nabíjecí systémy umožňující provoz vozidel s relativně malými akumulátory jsou investičně velice nákladné.

Velmi efektivním řešením elektrického silničního vozidla pro městskou hromadnou dopravu je parciální trolejbus, tj. trolejbus s doplněnou akumulátorovou trakční baterií. Toto vozidlo spojuje přínosy provozu elektrobuse a trolejbusu a jeho výhody jsou především tyto:

- Možnost použití relativně malých trakčních baterií
- Není nutné budovat trakční vedení v celé trase linky
- Výhodné využití akumulátorového napájení například při přejezdech v depech a při výlukách, operativní změny vedení linek
- Eliminace nabíjecích časů – trakční akumulátory jsou nabíjeny při jízdě na úseku s trolejovým vedením, nabíjení lze tak rozložit do delších časů s příznivými dopady na profil odběru energie z distribuční sítě a na životnost trakčních baterií
- Využívají se standardní technologie pro infrastrukturu trolejbusů

Parciální trolejbusy v současnosti využívají všechna města v ČR, která provozují trolejbusovou dopravu. O oblibě tohoto typu vozidla svědčí i skutečnost, že výrobci vozidel zaznamenávají minimální poptávku po konvenčních trolejbusech, téměř všechny dodávané trolejbusy jsou v současnosti vybaveny také trakční baterií. Jako velmi efektivní se ukazuje tento dopravní mód například při obnově trolejbusového provozu v Praze.



Obr. 10 Koncepte elektrovýzbroje parciálního trolejbusu

Na obr. 10 je příklad koncepte elektrické výzbroje parciálního trolejbusu. Koncept elektrické výzbroje je podobný jako u elektrobuse, ale DC nabíječ, který je napájený přes trolejový sběrač, není nutno realizovat jako galvanicky oddělený, protože trolejová síť pro napájení trolejbusu je izolovanou soustavou chráněnou v napájecí stanici hlídačem izolačního

stavu. Napětí trolejové sítě je v trolejbusových provozech stejnosměrné 600 V nebo 750 V. V některých koncepcích parciálních trolejbusů je vstupní měnič vynechán nebo pracuje jen v případě rekuperace do trolejového vedení. Další odlišnost od elektrobusu je v použití oddělovacího měniče mezi stejnosměrnou sběrnici a trakční baterií. Vzhledem k izolované napájecí soustavě nemusí být tento měnič galvanicky oddělený. V některých případech je měnič trakční baterie využíván jako nabíječ a při provozu s akumulátorovým napájením je trakční baterie stykačem připojena přímo na stejnosměrnou sběrnici. Výkony trakčních pohonů parciálních trolejbusů jsou obdobné jako u elektrobusů, v některých případech je výkon vozidla omezen při jízdě s akumulátorovým napájením. Kapacity trakčních baterií parciálních trolejbusů se zpravidla pohybují v rozmezí 40 až 90 kWh v závislosti na délce vozidla a počtu trakčních motorů. Používají se zde technologie článků LTO nebo NMC HP.

Specifickou oblastí elektrických silničních vozidel jsou těžké nákladní automobily a kamionové tahače. Lze vysledovat, že rozvoj v této oblasti je za rozvojem elektrických vozidel pro osobní dopravu opožděn přibližně o 10 let. Specifickým problémem je zde nutnost vysokých výkonů instalovaných jak ve vozidlech, tak výkonů nabíjecí infrastruktury. Například v oblasti elektrických tahačů pro kamionovou dopravu se pohybují výkony trakčních pohonů přibližně od 300 kW do vyšších stovek kW. Nabíjecí infrastruktura musí zajistit nabíjení trakčních akumulátorů výkony v řádech nižších jednotek MW. To významně komplikuje tuto nabíjecí infrastrukturu nejen z hlediska velikosti rezervovaných výkonů v distribuční síti nebo z hlediska instalace stacionárních vyrovnávacích akumulačních jednotek, ale také z hlediska možného použití napěťových hladin do 1000 V. Při vysokých výkonech a relativně nízkých napěťových hladinách je nezbytné pracovat s vysokými proudy, pro které se v nabíjecích systémech musí například instalovat vodní chladicí okruh do průřezu nabíjecích kabelů. Kapacity trakčních baterií elektrických tahačů se pohybují v hodnotách až do 1000 kWh.

Nutnost dodávky vysokých výkonů při napětí do 1000 V je motivem pro rozvoj netradičních nabíjecích systémů právě v oblasti těžké nákladní dopravy. Jedná se především o systémy výměny akumulátorů a systémy trolejového napájení těžkých elektrických nákladních vozidel. V zahraničí je plánována částečná elektrifikace některých dálničních komunikací trolejovým vedením obdobným trolejovému systému pro trolejbusy. Z povahy silniční dopravy je zde však možné použít trolejové napětí jen do 1000 V (typicky 750 V). V případě přenosu vysokých výkonů je však nutné při takovéto hladině napětí pracovat s vysokými proudy s negativními dopady na úbytky napětí v trolejové soustavě a na snížení účinnosti přenosu elektrické energie v trolejové síti.

Specifickým systémem pro nabíjení elektrických silničních vozidel jsou technologie pro bezkontaktní indukční nabíjení. V případě těchto systémů jsou do vozovky instalovány indukční smyčky – analogie primárního vinutí transformátoru. Sekundární vinutí je umístěno ve vozidle a při jízdě slouží k přenosu energie do vozidla magnetická vazba. Uvedené systémy bezkontaktního nabíjení jsou v zahraničí především ve fázi zkoušek. Jedná se o systémy poměrně komplikované a investičně náročné, technickým problémem je zde například velké rozptylové magnetické pole způsobené relativně velkou vzdáleností stacionární a vozidlové části nabíjecího zařízení. Zřejmě až budoucnost ukáže, nakolik tyto systémy najdou uplatnění.

Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Pohonné a napájecí systémy pro elektromobilitu

Speciální typy elektrických pohonů

Studijní materiál

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.

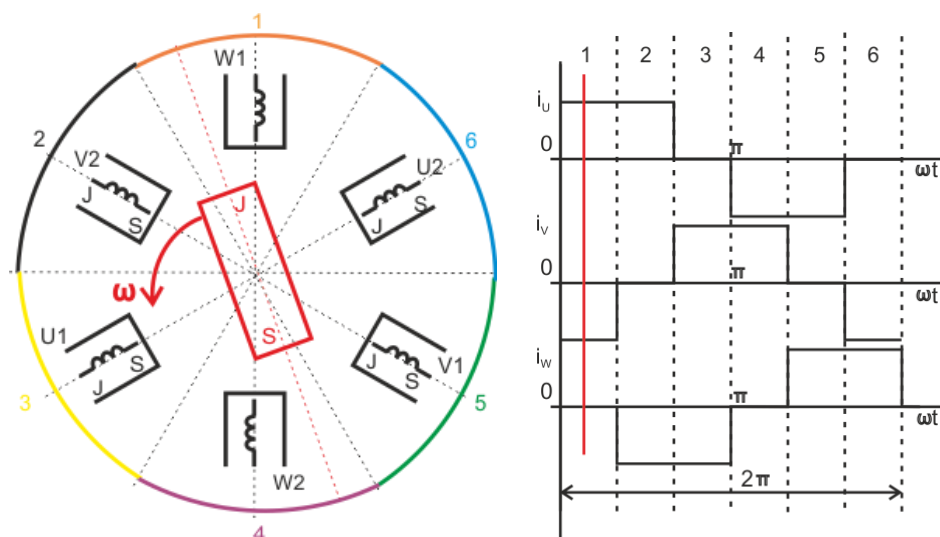


Speciální typy elektrických pohonů

1 Pohony se stejnosměrnými bezkartáčovými (bezkomutátorovými) motory (BLDC)

Stejnoseměrné bezkartáčové – bezkomutátorové (také elektronicky komutované) motory (Brushless DC electric motor, BLDC motor) jsou v principu synchronní motory s třífázovým statorem a permanentními magnety na rotoru. **Jsou vždy napájeny z elektronických měničů, které mají výkonovou část jako střídače pro frekvenčně řízené asynchronní nebo synchronní motory. Způsob řízení je však jednodušší, než u synchronních motorů s permanentními magnety (SPMSM a IPMSM), jednodušší je i senzorická část a navenek má pohon vlastnosti velice podobné stejnosměrnému motoru s cizím buzením.** Stejnoseměrné bezkartáčové motory se používají ve stále větší míře a v řadě aplikací nahrazují stejnosměrné motory, střídavé komutátorové motory se sériovým buzením a jednofázové asynchronní motory. Jejich použití se zvětšuje například v drobnějších domácích spotřebičích, v některých průmyslových aplikacích a v trakčních pohonech. V trakčních pohonech se stejnosměrné bezkartáčové motory používají především u jednostopých vozidel, jako jsou elektrokolá, elektrokoloběžky nebo elektroskútry.

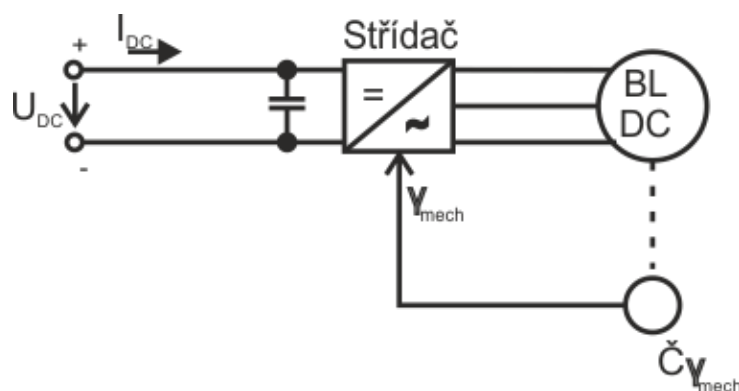
V nejjednodušším případě se u dvoupólového stejnosměrného bezkartáčového motoru uskutečňuje **napájení obdélníkovými pulsy napětí a přibližně obdélníkovými pulsy proudu**. Každá perioda napájecího napětí a proudu se skládá ze šesti dílčích subperiod, v rámci každé subperiody jsou na fázi statorového vinutí připínány konstantní úseky napětí, jimž odpovídají úseky přibližně konstantních proudů fází, v této úvaze se zanedbává vliv indukčnosti vinutí fází. Magnetické účinky proudů fází statoru se spolu s magnetickým tokem rotoru podílejí na vytvoření točivého momentu. **Ve vazbě na úhlové natočení rotoru se přepínají intervaly vedení proudů ve fázích tak, aby byl udržován stálý točivý moment ve stálém směru.** Tento princip je pro dvoupólový motor zřejmý z obr. 1.



Obr. 1 K principu funkce stejnosměrného bezkartáčového motoru

Okamžité úhlové natočení rotoru na obr. 1 a) odpovídá okamžiku, který je vyznačen svislou červenou čarou na obr. 1 b). Z obr. 1 je zřejmé, že **proudy a tím i magnetické toky cívek statoru se předbíhají o 150° až 30° před úhlovým natočením rotoru a tím i rotorového magnetického toku.** Vedení proudu ve fázi statoru v jedné polaritě má dobu trvání 120° , v rámci těchto 120° je proud ve fázi konstantní (při zanedbání vlivu indukčnosti fázového vinutí). Během těchto 120° vedení proudu ve fázi se rotor otočí o 120° . Poté se

v dané fázi nastaví další stav tak, aby proud dané statorové cívky předbíhal v celém intervalu 120° rotor, opět o 150° až 30° . Střední hodnota úhlu, o který je předbíháno úhlové natočení rotoru magnetickým polem statorových proudů, je 90° . Pól statoru, který je míjen pólem rotoru, musí být v tomto intervalu 60° s nulovým proudem, tedy bez magnetických účinků. Ze souvislosti obr. 1 a) a 1 b) tedy vyplývá, že elektronický měnič – střídač – musí zajistit **přepínání stavů 1 až 6 synchronizovaně s úhlovým natočením rotoru. Každý stav připojení proudů do fázových vinutí trvá 60°** , tedy každému intervalu úhlu natočení rotoru odpovídá jeden proudový stav třífázového vinutí statoru. To je v obr. 1 a) a b) vyznačeno čísly intervalů úhlu a na obr. 1 a) jsou ve vztahu k úhlu natočení rotoru vyznačeny barevně číslicemi odpovídající proudové stavy. Tím, že jsou proudové stavy v jednotlivých fázích statorového vinutí přepínány v závislosti na úhlovém natočení rotoru, je **nutno řídicímu systému elektronického střídače poskytnout informaci o okamžitém úhlovém natočení rotoru**. To se zpravidla uskutečňuje pomocí **snímače úhlového natočení rotoru**. Přepínání proudových stavů ve vinutích statoru v závislosti na úhlovém natočení rotoru představuje **analogii funkce komutátoru u stejnosměrného stroje**. Komutátor stejnosměrného stroje také přepíná – komutuje – proudové stavy v cívkách rotoru v neutrále, tedy v závislosti na úhlovém natočení rotoru. Komutátor stejnosměrného stroje tedy v sobě spojuje funkci mechanického přepínače a snímače úhlového natočení. U bezkartáčového stejnosměrného motoru jsou obě funkce odděleny, okamžité úhlové natočení rotoru indikuje snímač a na základě informace z tohoto snímače zajišťuje přepínání proudových stavů elektronický střídač. Blokově je struktura pohonu se stejnosměrným bezkartáčovým motorem znázorněna na obr. 2.

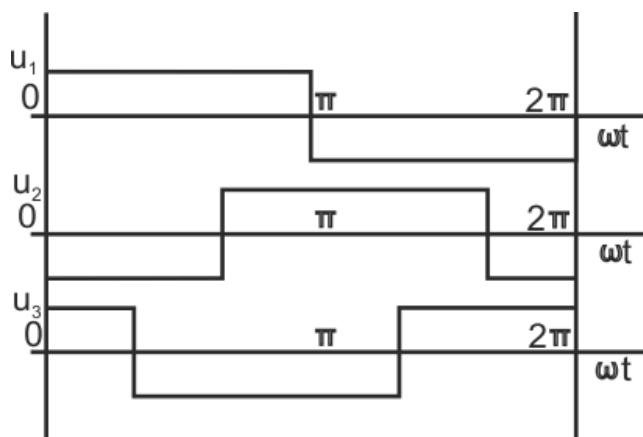


Obr. 2 Bloková struktura pohonu se stejnosměrným bezkartáčovým motorem

Analogie stejnosměrného motoru a stejnosměrného bezkartáčového motoru se však neuplatňuje jen z hlediska analogií mechanických a elektronických komutací, ale i z hlediska vnějších vlastností stroje. Bude-li se na vstupu střídače stejnosměrného bezkartáčového motoru zvyšovat hodnota stejnosměrného napájecího napětí U_{DC} , budou se zvyšovat otáčky naprázdno a mechanické otáčky stejnosměrného bezkartáčového motoru, platí tedy $n \sim U_{DC}$, proud na vstupu střídače stejnosměrného bezkartáčového motoru I_{DC} určuje moment, $M \sim I_{DC}$. Analogie s konvenčním stejnosměrným strojem je zde tedy zřejmá. **Elektronická komutace zde nahrazuje konstrukčně složitý a méně spolehlivý mechanický komutátor.** Měnit otáčky motoru změnou vstupního napětí střídače U_{DC} a moment změnou vstupního proudu střídače I_{DC} by komplikovalo konstrukci pohonu nutností předřazení dalšího elektronického měniče před střídač. Proto střídače pro stejnosměrné bezkartáčové motory zpravidla pracují se šířkově pulsní modulací, která v jednotlivých proudových stavech určuje velikost efektivních hodnoty proudů a napětí na výstupu střídače a tímto způsobem jsou řízeny moment a otáčky stroje. Princip šířkově pulsní modulace je zde obdobný jako u stejnosměrných a asynchronních motorů, jak bylo vysvětleno v kapitolách 11.4 a 10.5.3.

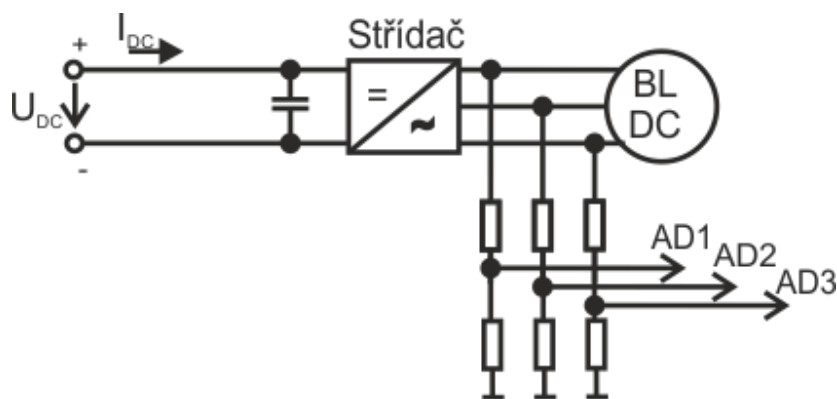
Šířkově pulsní modulace pak zajistí elektronickou komutaci motoru se současným řízením efektivních hodnot proudů a napětí motoru v jednom měniči – střídači a celý pohon je pak možno napájet ze zdroje konstantního stejnosměrného napětí, například z diodového usměrňovače nebo z akumulátoru.

U dvoupólového stejnosměrného bezkartáčového motoru se za jednu otáčku vystřídá 6 proudových stavů. Změny těchto stavů jsou vázány na okamžité úhlové natočení rotoru. Z toho vyplývá, že u dvoupólového bezkartáčového motoru postačuje vyhodnocovat úhlové natočení rotoru v rámci intervalu 60° , tedy 6 úhlových stavů. Tato skutečnost umožňuje velmi jednoduchou konstrukci snímače úhlového natočení rotoru. Pro snímání úhlového natočení se zpravidla používá **trojice snímačů magnetické indukce** s Hallovou sondou. Tyto snímače jsou ve stroji umístěny se vzájemným prostorovým úhlem 120° a vyhodnocují v podstatě polaritu okamžité magnetické indukce od permanentních magnetů na rotoru. V závislosti na okamžitém úhlu natočení rotoru pak snímače poskytují trojici signálů podle obr. 3. Každý interval úhlu 60° je pak reprezentován unikátní kombinací výstupních hodnot signálů snímačů úhlového natočení, z kombinace hodnot signálů snímačů úhlového natočení lze tedy indikovat aktuální úhlový interval a jemu přiřadit odpovídající stav proudů ve fázích statorového vinutí, který je nastaven elektronickým střídačem.



Obr. 3 Průběh signálů snímačů úhlového natočení rotoru stejnosměrného bezkartáčového motoru

Výše popsaný princip řízení bezkartáčového motoru vyžaduje použití snímačů úhlového natočení rotoru pro synchronizaci. Pro určování úhlového natočení rotoru je však možné využít i snímání průběhu indukovaného napětí, neboť úhel indukovaného napětí je obecně pevně svázán s úhlovým natočením rotoru a magnetickým tokem rotorových permanentních magnetů. Tyto dvě veličiny jsou vzájemně kolmé. Pro snímání úhlového natočení prostřednictvím snímání okamžité hodnoty indukovaného napětí je nutné, aby ve fázi, kde je měřeno indukované napětí, neprotékal proud. Indukovaná napětí se snímají v bezproudových intervalech v jednotlivých fázích pomocí obvodu na obr. 4. Jedná se o odporový dělič zapojený z každé fáze do hvězdy, tedy vůči referenční hladině napětí. V uzlech děličů jsou snímána v bezproudových intervalech indukovaná napětí AD převodníky a jejich průběhy poskytují informaci pro synchronizaci řízení střídače. Výhodou tohoto způsobu řízení je absence přímého snímání úhlového natočení (tzv. bezsenzorové řízení).



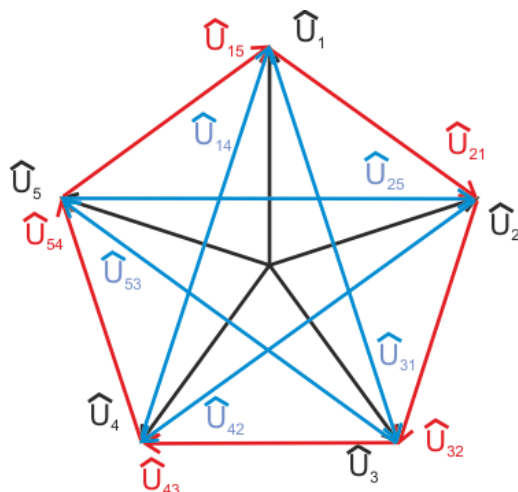
Obr. 4 K vysvětlení bezsenzorového řízení bezkartáčového motoru

2 Vícefázové střídavé elektromotory

Točivé magnetické pole je možno vytvořit nejen při napájení třífázového statoru elektrického stroje z třífázové soustavy napětí a proudů, ale i prostřednictvím jiného počtu fází s odpovídajícími prostorovými úhly mezi vinutími na statoru stroje a odpovídajícím fázovým posunutím proudů jednotlivých fází. **Je možno vytvořit točivé magnetické pole pomocí dvou fází s posunem 90°, ale i pomocí vyššího počtu fází. Vícefázovými elektromotory rozumíme motory s větším počtem fází než 3. Vícefázové motory jsou vždy napájeny z elektronického měniče a vždy jsou frekvenčně řízeny.** Realizují se až devítifázové stroje. **Vícefázové stroje se realizují zpravidla jako asynchronní nebo synchronní s permanentními magnety.** Používají se v pohonech s vysokými nároky na spolehlivost a s požadavky na možnost nouzového provozu s nižším počtem fází. Jedná se například o pohony výtahů, bezpečnostně kritické pohony v průmyslových technologiích a technologiích budov. Vícefázové synchronní motory s permanentními magnety začínají nacházet uplatnění i v pohonech dopravních prostředků především z důvodu jejich předpokladů pro dosažení velké účinnosti (až 97%). Hlavní výhody vícefázových elektromotorů jsou následující:

- Proudů motoru se rozloží do více fází, tedy dochází k nižšímu proudovému namáhání motoru i elektronického měniče s předpokladem snížení ztrátového výkonu v odporech vinutí.
- Předpoklady pro dobré vlastnosti při nouzovém provozu při výpadku napájení jedné fáze.
- Předpoklady ke zvýšení momentu a výkonu díky možnosti injektáže vyšších harmonických složek proudu statoru s pozitivními dopady na využití magnetického obvodu motoru a zvýšení účinnosti motoru (typicky injektáž 3. harmonické složky proudu).

Základní vlastnosti vícefázových motorů zde budou vysvětleny na případu **pětifázového elektromotoru**. Bude uvažována **souměrná pětifázová soustava** (efektivní hodnoty napětí jsou ve všech fázích stejné, fázové posuny sousedních fázových napětí jsou shodné), předpokládá se, že **motor je souměrnou pětifázovou zátěží** (impedance všech fází jsou shodné z hlediska velikosti i fázového posunu, tj. stejné odpory a indukčnosti všech fázových vinutí). Při nejjednodušším zapojení vinutí pětifázového motoru do hvězdy jsou vinutí napájena **fázovými proudy s fázovým posunem 72°**. **Prostorový posun vinutí po obvodu statoru je také 72°**. Generování fázových proudů s uvedeným fázovým posunem je zajištěno pětifázovým střídačem, který pracuje se šířkově pulsní modulací na obdobném principu generování fázových napětí jako střídač třífázový. Fázorový diagram fázových napětí pětifázového motoru je vyznačen na obr. 5 černou barvou.



Obr. 5 Fázorový diagram pětifázového motoru

Jak je z obr. 5 zřejmé, v pětifázové soustavě jsou **dva typy sdružených napětí**, tj. sdružená napětí mezi sousedními fázemi $U_{21}, U_{32}, U_{43}, U_{54}, U_{15}$ (v obr. 5 vyznačena červeně) a sdružená napětí mezi fázemi, které spolu nesousedí $U_{31}, U_{53}, U_{14}, U_{42}, U_{25}$ (v obr. 5 vyznačena modře). Z trojúhelníku dvou sousedních fázových napětí a odpovídajícího sdruženého napětí prvního typu lze odvodit relaci mezi efektivními hodnotami fázového napětí U_f a efektivními hodnotami těchto sdružených napětí U_{s1} :

$$\frac{1}{2} \cdot U_{s1} = U_f \cdot \sin 36^\circ \rightarrow U_{s1} = 1,176 \cdot U_f \quad (1)$$

Druhý typ sdružených napětí U_{s2} je dán rozdílem dvojic fázových napětí, které spolu nesousedí. Pro velikost efektivních hodnot těchto sdružených napětí U_{s2} platí:

$$\frac{1}{2} \cdot U_{s2} = U_f \cdot \sin 72^\circ \rightarrow U_{s2} = 1,902 \cdot U_f \quad (2)$$

U pětifázového motoru lze tedy rozlišit napětí fázové U_f a dva typy sdružených napětí U_{s1} a U_{s2} . Fázové posuny odpovídajících si typů napětí jsou vždy 72° (v případě souměrné soustavy). V návaznosti na tuto skutečnost lze potom obecně rozlišit tři možné typy zapojení pěti fázových vinutí:

1. Zapojení do hvězdy – na každém vinutí fáze motoru je fázové napětí U_f (využívají se napětí na obr. 5 označené černě).
2. Zapojení do pětiúhelníku – na každém vinutí fáze motoru je sdružené napětí U_{s1} (využívají se napětí na obr. 5 označené červeně).
3. Zapojení do pentagramu – na každém vinutí fáze motoru je sdružené napětí U_{s2} (využívají se napětí na obr. 5 označené modře).

Jak bylo uvedeno výše, u pětifázového motoru se celkový výkon rozloží do většího počtu fází, při shodné hodnotě napájecího napětí protékají fázemi motoru menší proudy než v případě třífázového provedení. Pro celkový činný výkon, který u elektromotorů s vysokou účinností úzce koresponduje s mechanickým výkonem, lze u motoru s m fázemi psát:

$$P = m \cdot U_f \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Budeme-li uvažovat shodné napájecí napětí motoru a shodný účinník $\cos \varphi$, sníží se u pětifázového motoru efektivní hodnota proudu při shodném napětí, shodném účinníku a shodném výkonu v poměru $3/5 = 0,6$. Vzhledem ke kvadratické závislosti mezi proudem a ztrátovým výkonem v odporu vinutí se v jednom vinutí sníží ztrátový výkon u pětifázového motoru na 0,36 násobek v relaci s třífázovým motorem. Vzhledem k většímu počtu vinutí tak při jinak stejných podmínkách klesnou ztráty v odporech statorových vinutí pětifázového motoru na 0,6 násobek hodnoty ztrát třífázového motoru. Při opačném požadavku – zachování

proudové hustoty pro případ třífázového a pětifázového motoru dojde u pětifázového motoru k úspoře mědi pro vinutí díky možnosti použití vodičů nižšího průřezu pro pětifázový motor.

Jako další výhoda vícefázových motorů byla uvedena možnost nouzového provozu s menšími omezeními. Například u třífázového motoru je při výpadku jedné fáze možno motor provozovat s momentem redukováným přibližně o 35% při nárůstu proudu o 35%. V případě pětifázového motoru dojde při výpadku napájení jedné fáze k redukci momentu přibližně o 20%, proud ve funkčních fázích se přitom zvýší přibližně o 16%.

Principy, mechanické vlastnosti a metody frekvenčního řízení jsou u vícefázových motorů analogické jako v případě třífázových motorů. U vícefázových motorů je principiálně odlišnost ve způsobu vytvoření točivého magnetického pole.

Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Pohonné a napájecí systémy pro elektromobilitu

Struktura trakční výzbroje osobního
elektrického automobilu

Studijní materiál

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.

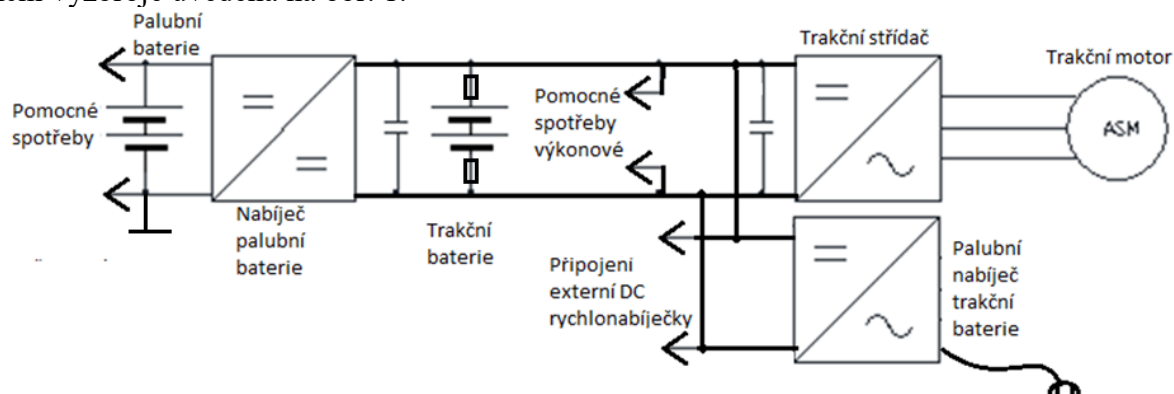


Struktura trakční výzbroje osobního elektrického automobilu

Konkrétní struktury trakčních výzbrojí osobních elektrických automobilů se v závislosti na typu vozidla odlišují, vždy jsou ale ve vozidle zastoupeny následující systémy:

- Trakční elektromotor nebo více trakčních elektromotorů
- Systémy přenosu mechanického výkonu z hřídele elektromotoru na hnací nápravu nebo kola
- Trakční měnič nebo měniče
- Trakční akumulátorová baterie
- Palubní nabíjecí systém
- Spínací a jisticí přístroje
- Obvody pomocných spotřeb včetně pomocné palubní akumulátorové baterie

Pro případ osobního elektrického vozidla s jedním elektromotorem je bloková struktura trakční výzbroje uvedena na obr. 1.



Obr. 1 Bloková struktura trakční výzbroje osobního elektrického automobilu s jedním trakčním motorem

V elektrických silničních vozidlech se v současnosti používají **výhradně trakční motory na střídavý proud**, v největší míře **třífázové**, začínají se však uplatňovat i motory vícefázové. Jedná se vždy buď o motory **asynchronní nebo synchronní**. Trakční motor na obr. 1. je napájen z **trakčního měniče – střídače**. Po stránce silového zapojení a principu funkce pracují trakční střídače na elektrických vozidlech stejně jako střídače ve frekvenčních měničích pro průmyslové pohony, jak bylo popsáno v podkapitole 10.5.3. Střídač tedy pracuje se **šířkově pulsní modulací**, generuje na svém výstupu **obdélníkové pulsy napětí, proud motoru je ve velké míře filtrován indukčnostmi motoru a má výrazně vyjádřený sinusový průběh** jen se zbytkovým zvlněním od šířkově pulsní modulační.

Centrálním energetickým uzlem elektrické výzbroje elektrického automobilu je **stejnoseměrný mezipřívod**. Do stejnosměrného mezipřívodu je připojena **trakční akumulátorová baterie** jako hlavní zdroj elektrické energie na vozidle. Jmenovitá hodnota stejnosměrného napětí stejnosměrného mezipřívodu je určena jmenovitou hodnotou napětí trakční akumulátorové baterie a u elektrických silničních vozidel se v závislosti na typu vozidla pohybuje v rozmezí 300 až 800 V. U nejnovějších typů elektrických silničních vozidel je toto napětí **nejčastěji 800 V**. Okamžitá hodnota napětí stejnosměrného mezipřívodu a trakční akumulátorové baterie se při provozu vozidla mění v rozsahu ± 15 až $\pm 20\%$ jmenovité hodnoty, což je dáno vlastnostmi trakční akumulátorové baterie. U moderních elektrických vozidel je tendence používat právě hladinu jmenovitého napětí 800 V, neboť vyšší napěťová hladina umožňuje pracovat s vyššími výkony při nižším proudovém zatížení a tedy i při nižších ztrátách ve všech částech elektrického obvodu. Z hlediska okamžité hodnoty napětí ve stejnosměrném mezipřívodu je však nutné dbát na to, aby nebyla překročena hladina

1000 V. Obvody provozované do napětí 1000 V se řadí do kategorie obvodů **nízkého napětí**, obvody pro napětí nad 1000 V se řadí již do obvodů **vysokého napětí**. V obvodech vysokého napětí již platí komplikovanější elektrotechnická legislativa vůči obvodům nízkého napětí, vysokonapěťové obvody musí být po všech stránkách koncipovány na vyšší elektrickou pevnost a to konstrukci takového obvodu výrazně komplikuje a zvyšuje cenu. Pro práci na vysokonapěťových obvodech jsou navíc určeni jen pracovníci, na které jsou legislativou kladeny vyšší kvalifikační požadavky ve srovnání s pracovníky určenými pro práci na nízkonapěťových zařízeních. Z těchto uvedených důvodů se hladina napětí trakčního obvodu 800 V jeví pro elektrická silniční vozidla jako optimální, neboť umožňuje dostatečné výkonové dimenzování trakční výzbroje z hlediska trakčního a nabíjecího výkonu a přitom se jedná stále o hladinu nízkého napětí včetně napěťových tolerancí.

Poznámka k terminologii: V oblasti automobilní techniky se velice často pro obvod trakční akumulátorové baterie používá termín vysokonapěťový obvod, i když se jedná o obvod s napětím do 1000 V. Z hlediska obecné elektrotechnické terminologie a legislativy se však nejedná o vysokonapěťový obvod, ale o obvod nízkého napětí. V návaznosti na problematiku obecné bezpečnosti práce na elektrických zařízeních zde lze připomenout, že obvody s bezpečným napětím (například obvody pomocné palubní baterie 12 V) jsou v obecné elektrotechnické terminologii a legislativě označovány jako obvody malého napětí.

Z trakční akumulátorové baterie je napájen trakční střídač pro trakční motor a dále jsou z této baterie napájeny obvody pomocných spotřeb na vozidle. Obvody pomocných spotřeb jsou obvykle na vozidle členěny do dvou skupin:

- **Výkonové pomocné spotřeby** (typicky klimatizace a topení vozidla, topení je na elektrických vozidlech realizováno buď přímotopnými odporovými články nebo kombinací těchto článků pro rychlý ohřev vozidla a tepelného čerpadla) – **napájené přímo z napětí trakční akumulátorové baterie**, pracuje se s výkony těchto pomocných spotřeb v řádech jednotek kW.
- **Ostatní pomocné spotřeby** (řídící, senzorické a diagnostické systémy, osvětlení, pohony pomocných zařízení např. stěrače a další pomocné systémy) – **napájení z pomocné palubní baterie**, u osobních vozidel 12 V, u nákladních vozidel a autobusů 24 V, pracuje se s výkony těchto pomocných spotřeb v řádech stovek W.

Pro obvod trakční akumulátorové baterie na elektrických vozidlech je charakteristické, že se jedná o **izolovanou elektrickou soustavu**. Oba póly trakční akumulátorové baterie jsou tedy galvanicky – vodivě – oddělené od neživých částí celého vozidla. Toto řešení vyžaduje jednak **spínání a jištění** (stejnoseměrnými pojistkami) **trakční akumulátorové baterie v obou jejích pólech** a dále je v izolované soustavě nutno použít **hlídač izolačního stavu**. Hlídač izolačního stavu je zařízení, které kontroluje izolační odpor mezi oběma póly trakční akumulátorové baterie a neživou částí vozidla – kostrou. V případě porušení tohoto izolačního stavu indikuje hlídač poruchu a je nutný následný servisní zásah.

Obvody pomocné palubní olověné baterie 12 V nebo 24 V tvoří izolovanou soustavu, ale jedná se o soustavu, kde je **záporný pól baterie spojen s neživou částí vozidla** jako u konvenčního automobilu.

Pomocná palubní baterie 12 V nebo 24 V je nabíjena z trakční akumulátorové baterie přes nabíječ, tj. stejnosměrný měnič. Vzhledem ke skutečnosti, že obvod trakční akumulátorové baterie je izolovanou soustavou a obvod pomocné palubní baterie je spojen s neživou částí vozidla, musí být **nabíječ pomocné palubní baterie galvanicky oddělený**, typicky vysokofrekvenčním transformátorem, který pracuje s frekvencemi v řádu desítek až nižších stovek kHz. Při nabíjení pomocné palubní baterie je tedy napětí trakční akumulátorové baterie ve vstupním střídači nabíječe nejprve změněno na střídavé a po oddělení transformační vazbou a úpravě hladiny efektivní hodnoty napětí je napětí usměrněno výstupním usměrňovačem.

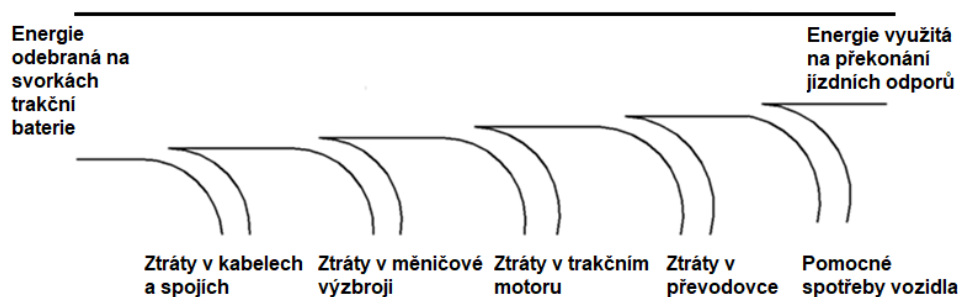
Dodávka energie do trakční akumulátorové baterie – nabíjení – se může u převážné většiny osobních elektrických vozidel uskutečňovat jedním ze tří způsobů:

- Střídavé pomalé nabíjení (AC nabíjení)
- Stejnoseměrné rychlé nabíjení (DC nabíjení)
- Nabíjení při generátorickém brzdění trakčního pohonu vozidla při snižování rychlosti nebo při jízdě ze spádu (rekuperační brzdění)

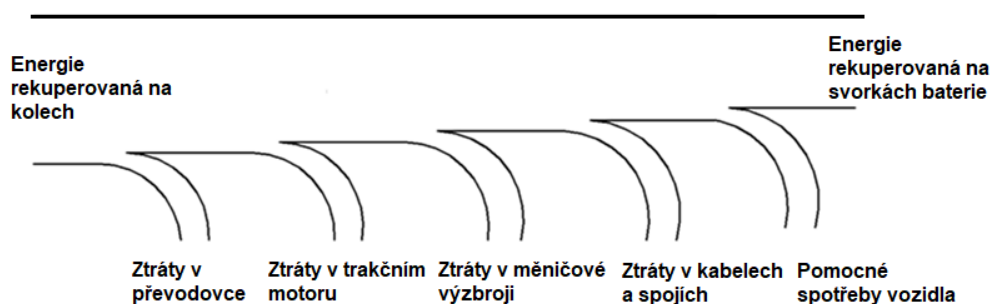
Při **střídavém nabíjení** se používá **palubní vozidlová nabíječka**, která se připojí na jednofázovou síť 230 V 50 Hz nebo třífázovou elektrickou síť 3x400 V 50 Hz, v obou případech je zde předpoklad sítě TN-S. Vzhledem ke skutečnosti, že střídavá síť TN-S je uzemněná a obvod trakční baterie vozidla je izolovaná soustava, musí **palubní vozidlová nabíječka zajistit galvanické oddělení** elektrické sítě a obvodů vozidla. Maximální výkon při AC nabíjení je zpravidla omezen dimenzováním vozidlové palubní nabíječky na konkrétním vozidle. Obecně je možno **AC nabíjení realizovat maximálně do výkonu 22 kW** (odpovídá jištění třífázové elektrické sítě jističem 32 A), většina elektrických vozidel je však vybavována palubními nabíječkami do 11 kW (odpovídá jištění třífázové elektrické sítě jističem 16 A).

Při **stejnoseměrném nabíjení** jsou póly trakční akumulátorové baterie připojeny na **externí nabíjecí stanici**. Ta je napájena z třífázové sítě, zpravidla 3x400 V 50 Hz. Externí nabíjecí stanice musí také zajistit **galvanické oddělení elektrické napájecí sítě a izolované soustavy trakční akumulátorové baterie ve vozidle**.

Ze struktury elektrické výzbroje vozidla na obr. 1 vyplývá výkonová bilance vozidla v **jízdním režimu** (obr. 2) a v **brzděném režimu** (obr. 3).



Obr. 2 Výkonová bilance elektrického akumulátorového vozidla v jízdním režimu



Obr. 3 Výkonová bilance elektrického akumulátorového vozidla v brzděném režimu

V rámci trakčního řetězce lze pro jmenovitý bod orientačně uvažovat následující hodnoty účinností hlavních komponent:

Trakční akumulátorová baterie: 95%

Trakční měnič 95: až 99%

Trakční motor: 93 až 97%

Převodovka: 95 až 99%

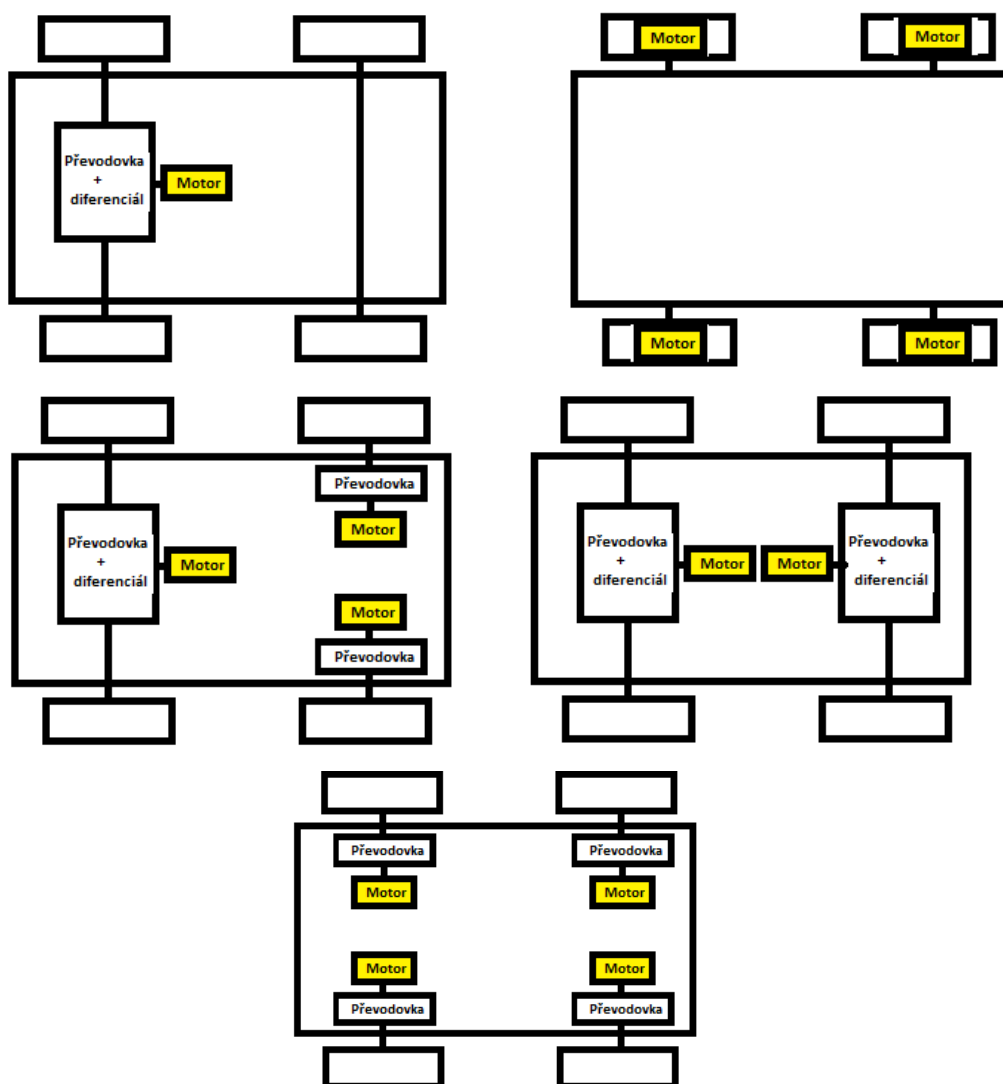
2. Elektromotory pro trakční pohony elektrických silničních vozidel, trakční charakteristika a přenos výkonu na kola

V elektrických silničních vozidlech se používají **asynchronní nebo synchronní trakční motory**. Asynchronní motory se používají v některých případech v elektrických osobních automobilech a ve většině případů se používají u elektrobusů a trolejbusů. U osobních elektrických vozidel lze vysledovat jednoznačný trend k používání **synchronních motorů s permanentními magnety** SPMSM a IPMSM. Některé automobilky (Renault, BMW) používají ve svých elektrických vozidlech i synchronní motory s budícím vinutím na rotoru. U malých elektrických vozidel (elektrokoloběžky, elektrokola, elektroskútry) se nejčastěji používají **stejnoseměrné bezkartáčové motory**. Výkony trakčních motorů pro osobní elektrické automobily se v závislosti na typu pohybují v rozsahu vyšších desítek až nižších stovek kW. Obvykle se jmenovité výkony trakčních motorů osobních elektrických automobilů pohybují v okolí 150 až 200 kW.

U řady typů elektrických automobilů se využívá **dvoumotorový pohon**. Důvody tohoto řešení nespočívají jen v rozdělení výkonu do dvou hnacích jednotek, ale tato konfigurace má předpoklady pro **zlepšení dynamických pohonných vlastností a zvýšení účinnosti** trakční výzbroje. Výkony trakčních motorů v elektrických automobilech s dvoumotorovým pohonem často nejsou stejné, mnohdy se jedná i o kombinaci použití synchronního motoru s permanentními magnety a motoru asynchronního. Vychází se zde z obvyklé vlastnosti technických soustav, tedy i elektromotorů, že při nedostatečném vytížení klesá účinnost. U dvoumotorových pohonů elektrických automobilů se uplatňuje strategie řízení, kdy při požadavku na velký výkon pracují oba motory, při požadavku na nízký výkon pracuje pouze jeden. Lze synchronizovat chod obou motorů tak, aby celý pohon pracoval s maximální možnou účinností. Tímto řešením se zamezí režimům, kdy by pohon vozidla s jedním výkonným elektromotorem pracoval v řadě případů s nízkým výkonem a s malou účinností.

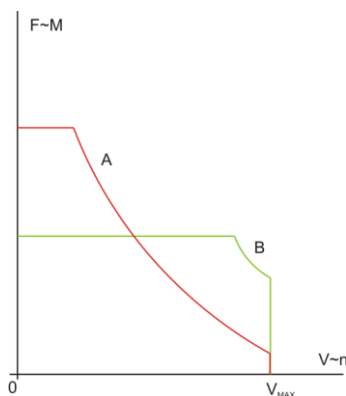
U elektrických silničních vozidel se používá více technických řešení přenosu výkonu z elektromotoru na kola. Hlavní typy řešení jsou následující (obr. 4):

- Pohon nápravy s elektromotorem s malým objemem pro vysoké otáčky ($10\,000\text{ min}^{-1}$ až $20\,000\text{ min}^{-1}$) s převodovkou do pomala s pevným převodem – nejobvyklejší řešení.
- Bezpřevodovkové individuální pohony dvou kol pomaloběžnými částečně odpruženými motory PMSM, elektrické řešení diferenciálu.
- Pohon nápravy pomaloběžným elektromotorem PMSM, konvenční řešení diferenciálu.
- Pomaloběžné motory PMSM s vnějšími rotory vestavěné v kolech, elektrické řešení diferenciálu.
- Pohon rychloběžným elektromotorem přes převodovku s řaditelnými převody, výrobci nabízejí integrované konstrukce motorů a převodovek s automatickým řazením, částečné snížení objemu elektromotoru a zvýšení jeho účinnosti však přináší větší složitost konstrukce a řízení. Toto řešení je v některých případech používáno u větších elektrických vozidel – elektrobusy, elektrické nákladní automobily.



Obr. 4. Možná uspořádání pohonů elektromobilů

Nejvýznamnější pohonné vlastnosti trakčního řetězce vozidla jsou vyjádřeny jeho **trakční charakteristikou**. Trakční charakteristika je závislost tažné síly vozidla F , která je úměrná celkovému momentu trakčních motorů, na rychlosti vozidla v , která je úměrná otáčkám trakčních motorů. Trakční charakteristika vymezuje tedy pracovní oblast pohonu v souřadnicích $F - v$. Trakční charakteristika se u vozidla udává pro jízdní a brzdny režim, výkony a síly jsou zpravidla v brzdny režimu vyšší než v jízdním. Příklady průběhů trakčních charakteristik jsou na obr. 5.



Obr.5 Příklady průběhů trakčních charakteristik

Jak je zřejmé z obr. 5, pracovní oblast trakčního pohonu je ohraničena souřadnicovými osami a průběhem trakční charakteristiky, která se skládá ze tří úseků:

- Úsek přibližně stálé tažné síly, ten je omezen maximálním momentem trakčního pohonu a adhezí.
- Úsek přibližně stálého výkonu (tzv. trakční hyperbola), ten je dán výkonem pohonné jednotky.
- Omezení maximální rychlosti vozidla.

Pro vozidla s elektrickým pohonem je typické, že jejich trakční charakteristika vykazuje poměrně **širokou oblast práce s konstantní tažnou silou**, tj. v relativně široké oblasti rychlostí tažná síla vozidla s rychlostí neklesá. V principu lze konstruovat vozidlo i s trakční charakteristikou B na obr. 4, kdy je tažná síla stálá prakticky v celém rozsahu rychlostí, zpravidla má však trakční charakteristika průběh, kdy je stálé tažné síly dosahováno v rozsahu jedné čtvrtiny (průběh A) až jedné poloviny rychlostního rozsahu. Průběh trakční charakteristiky má úzkou vazbu na průběh momentu střídavého elektromotoru v závislosti na otáčkách nebo frekvenci. Oblast trakční charakteristiky se stálou tažnou silou odpovídá řízení elektromotoru se **stálým, jmenovitým, magnetickým tokem**, oblast trakční charakteristiky s klesající tažnou silou koresponduje s provozem elektromotoru **v oblasti odbuzování**.

Frekvenčně řízené pohony s asynchronními a synchronními motory mají pro pohon vozidel velmi výhodné vlastnosti. Elektromotor je schopen pracovat s **plným momentem od nulových otáček**, díky elektronickému řízení je elektrický pohon schopen obsáhnout spojitě celou oblast vymezenou trakční charakteristikou, do jmenovité rychlosti je stálá tažná síla, elektropohon lze po omezenou dobu (například po dobu rozjezdu vozidla) významně (až 4x) momentově a výkonově přetěžovat, výhodou jsou obdobné vlastnosti elektropohonu při rekuperačním brzdění.

Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Pohonné a napájecí systémy pro elektromobilitu

Synchronní stroje

Studijní materiál

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.



Synchronní stroje

Synchronní stroje se uplatňují ve více aplikačních oblastech a jejich použití má obecně rostoucí trend. Tradiční oblastí využití synchronních strojů jsou **energetické aplikace**, tj. využití synchronních generátorů (alternátorů) v tepelných, vodních a v poslední době i ve větrných elektrárnách a v kogeneračních jednotkách. Synchronní generátory se využívají také jako zdroje elektrické energie v konvenčních silničních vozidlech, v hybridních vozidlech a ve vozidlech s elektrickým přenosem výkonu.

Přibližně od 90. let 20. století se začaly využívat synchronní motory s výkony přibližně do desítek kW v průmyslových pohonech, především v **servotechnice**, robotice a automatizační technice v aplikacích s regulací polohy a úhlového natočení. Využití synchronních motorů v této oblasti bylo iniciováno aplikacemi permanentních magnetů ze speciálních slitin s velkou magnetickou indukcí.

Po roce 2000 se synchronní motory začaly ve velké míře uplatňovat v **trakčních pohonech** v rámci rozvoje elektromobility a tento trend je rostoucí i v současnosti. Synchronní motory se používají u jednostopých elektrických vozidel (elektrokola, elektrokoloběžky, elektroskútry), stávají se dominantní pohonnou jednotkou v elektromobilech a v některých případech se využívají i u větších vozidel (tramvaje, elektrobusy, železniční vozidla).

Konstrukce synchronních strojů pro jednotlivé oblasti využití jsou poměrně odlišné, principy funkce a vlastnosti jsou však analogické. V následujícím textu budou uvedeny různé typy konstrukcí synchronních strojů i v souvislosti s oblastí využití, pozornost bude věnována i některým speciálním konstrukcím synchronních strojů.

1. Konstrukce synchronních strojů

Synchronní stroj se skládá ze statoru a z rotoru. **Stator synchronního stroje má ve většině případů stejnou konstrukci jako stator asynchronního stroje.** Statorový magnetický obvod je složen z plechů z feromagnetického materiálu a v drážkách magnetického obvodu je uloženo třífázové vinutí. Stejně jako u asynchronního motoru může být statorové vinutí synchronního stroje uspořádáno jako dvoupólové (počet pólů $p_{p1} = 2$) nebo vícepólové (počet pólů $p_{p1} > 2$). Některé synchronní stroje, především pomaluběžné, jsou konstruovány s velkými počty pólů s hodnotami až přes 20. Po připojení třífázové napájecí soustavy na stator synchronního stroje se vytvoří, stejně jako u asynchronního stroje, **točivé magnetické pole**, jehož synchronní úhlová rychlost je přímo úměrná frekvenci napájecího napětí a nepřímo úměrná počtu pólů dvojice.

Na rotoru synchronního stroje je umístěn zdroj stejnosměrného magnetického toku. Stejně jako u stejnosměrného stroje může být tímto zdrojem magnetického toku buď **budicí cívka nebo permanentní magnety**. U synchronních strojů je roven **počet pólů statoru p_{p1} počtu pólů rotoru p_{p2}** :

$$p_{p1} = p_{p2} = p_p \quad (1)$$

Základní členění typů konstrukcí rotoru synchronního stroje respektuje typ zdroje stejnosměrného magnetického toku:

- Stroje s rotorovým budícím vinutím protékaným stejnosměrným budícím proudem I_f
- Stroje s permanentními magnety na rotoru

Stroje s budícím vinutím na rotoru lze dále členit do dvou skupin:

- Stroje s vyniklými póly
- Stroje s hladkým rotorem

Stroje s permanentními magnety na rotoru se člení také do dvou skupin:

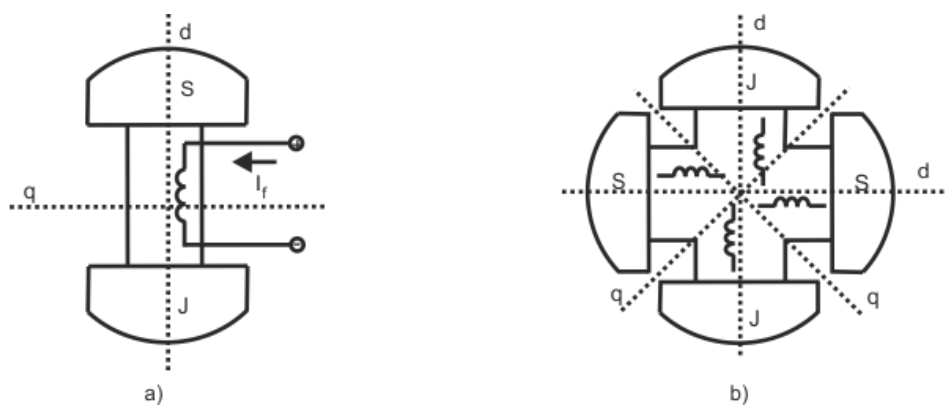
- Stroje s povrchovými magnety (SPMSM – Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)
- Stroje s vnořenými magnety (IPMSM – Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)

Stroje s budicím vinutím na rotoru se používají ve velké míře jako generátory v energetických zdrojích. Nejvýkonnější točivé elektrické stroje jsou právě tohoto typu a konstruují se pro výkony až do 1000 MW (například generátory v elektrárně Temelín). V aplikacích elektrických pohonů se stroje tohoto typu používají v největší míře v oblasti velkých výkonů až do desítek MW (například motory na kompresorových stanicích plynovodů). U některých typů elektrických silničních vozidel se používají synchronní motory s budicím vinutím i ve funkci trakčních motorů.

U strojů s budicím vinutím je specifickou úlohou přenos energie ze statoru do budicího vinutí na otáčejícím se rotoru. Zde se využívají dvě koncepce:

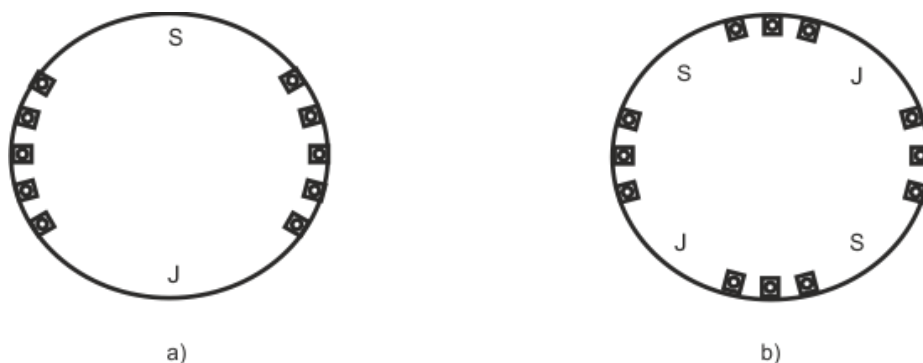
- Přenos stejnosměrného budicího proudu do rotoru kontaktně přes kroužky a kartáče (stejný princip se využívá pro vyvedení konců vinutí u asynchronních motorů s vinutou kotvou) – budicí vinutí je napájeno přes kroužky a kartáče z říditelného zdroje stejnosměrného proudu.
- Přenos stejnosměrného budicího proudu do rotoru bezkontaktně, induktivní cestou, budicí vinutí je napájeno ze speciálního transformátoru, jehož primární vinutí je na statoru synchronního stroje a sekundární vinutí je na rotoru – v tomto případě je velikost budicího proudu řízena na střídavé straně, tedy v obvodu primárního vinutí transformátoru a na rotoru synchronního stroje je umístěn diodový usměrňovač, který usměrní napětí sekundárního vinutí transformátoru (tzv. stroj s nesenými ventily), takovýto systém přenosu budicí energie se používá u nejvýkonnějších synchronních strojů, kde budicí proudy dosahují hodnot až několika kA

Stroje s budicím vinutím s vyniklými póly se používají typicky jako generátory ve vodních elektrárnách (hydroalternátory), tyto stroje se konstruují často jako vícepólové pro nižší otáčky. Principiální řešení konstrukce rotoru stroje s vyniklými póly s budicím vinutím je na obr. 1, na obr. a) je dvoupólový rotor, na obr. b) je čtyřpólový rotor. U vícepólových strojů se magnetická orientace pólů postupně střídá podle obr. 1 b). Tím, že se u tohoto typu stroje umísťuje budicí vinutí na vyniklé póly, vyznačuje se tato konstrukce rotoru magnetickou nesymetrií, tj. rozdílnými magnetickými odpory magnetického obvodu ve směru osy d a osy q na obr. 1.



Obr. 1 Konstrukční řešení rotoru synchronního stroje s vyniklými póly, na obr. a) je dvoupólový rotor, na obr. b) je čtyřpólový rotor

Synchronní stroje s budicím vinutím s hladkým rotorem se používají typicky jako generátory v tepelných elektrárnách (turboalternátory). Jsou určeny zpravidla pro vyšší otáčky s dvoupólovou konstrukcí. Rotor je válcový a ve feromagnetiku magnetického obvodu jsou vytvořeny drážky, ve kterých je uloženo budicí vinutí. Na rozdíl od rotoru s vyniklými póly je hladký rotor magneticky symetrický. Provedení dvoupólového a čtyřpólového hladkého rotoru synchronního stroje je v řezu na obr. 2. Na obrázku jsou znázorněny drážky rotoru s uloženým budicím vinutím.



Obr. 2 Konstrukční řešení hladkého rotoru synchronního stroje, na obr. a) je dvoupólový rotor, na obr. b) je čtyřpólový rotor

Velkou skupinou jsou synchronní stroje s permanentními magnety. Synchronní stroje s permanentními magnety se používají do výkonů přibližně 1 MW. Nejvýkonnější synchronní motory s permanentními magnety jsou určeny pro trakční pohony železničních vozidel, nejvýkonnější synchronní generátory s permanentními magnety (PMSG) se používají ve větrných elektrárnách.

Pro synchronní stroje se nepoužívají permanentní magnety z feritu, jako u stejnosměrných strojů, ale **magnety ze speciálních slitin**. Nejvíce používané jsou slitiny **NdFeB a SmCo**. Hlavní výhodou magnetů z těchto slitin je velká magnetická indukce, 3 až 4x vyšší oproti feritům. Srovnání hlavních vlastností těchto slitin je uvedeno v tab. 1.

Materiál	B_r [T]	H_k [A/m]	Max. ν [°C]	Curie ν [°C]
NdFeB	do 1,25	cca. $80 \cdot 10^4$	do 120	cca. 300
SmCo	do 1	cca. $68 \cdot 10^4$	do 300	700 - 800

Tab. 1 Přehled vlastností materiálů pro permanentní magnety

Z tab. 1 je zřejmé, že uvedené materiály disponují možností dosažení **remanentní magnetické indukce B_r v okolí 1T**. Hodnoty koercitivity H_k jsou vysoké a v běžném provozu prakticky nehrozí nebezpečí odmagnetování permanentních magnetů nepřiměřeně vysokou intenzitou magnetického pole. Především u magnetů NdFeB však při běžném provozu existuje **riziko odmagnetování magnetů zvýšenou teplotou**. U magnetů NdFeB je poměrně nízká Curieho teplota a pracovní teplota magnetů nesmí přesáhnout 120 až 130°C z důvodu rizika odmagnetování. Riziko nepřiměřeného zvýšení teploty permanentních magnetů se zvyšuje i díky skutečnosti, že v permanentních magnetech vznikají při provozu tepelné ztráty způsobené vířivými proudy, které jsou generovány v důsledku vyšších harmonických složek proudu statorového vinutí při napájení motorů z polovodičových měničů. Toto je specifická vlastnost strojů s magnety NdFeB, neboť u těchto strojů jsou zvýšenou teplotou zpravidla nejvíce ohroženy permanentní magnety, nikoli izolace vinutí, jako u ostatních typů

elektrických strojů. Nejvyšší třídy izolace vinutí mají v současnosti rozsah pracovních teplot až do 200 °C.

Magnety NdFeB měly především v dřívější době omezenou životnost vlivem koroze železa, postupně se však životnost těchto materiálů začaly zvyšovat dotováním slitiny kobaltem. Použití slitiny NdFeB je běžnější v důsledku vyšší magnetické indukce a nižší ceny. I tak je však navýšení ceny synchronních motorů s permanentními magnety oproti asynchronním motorům výrazné z důvodu vysoké ceny permanentních magnetů.

Před použitím se permanentní magnety musí zmagnetovat. To se uskutečňuje ve speciálních zařízeních pomocí proudových pulsů v magnetovací cívce s dobou trvání v řádech jednotek až desítek ms a s proudy v řádech kA.

Ve většině aplikací se v současnosti používají motory SPMSM. U těchto motorů se magnety na rotor připevňují lepením a poté se zafixují bandáží, aby se zmenšilo riziko jejich odtržení vlivem odstředivé síly. Magnety se na rotor lepí ve formě jednotlivých segmentů s rozměry desetin až nízkých jednotek cm. Na obr. 3 je znázorněn příklad provedení jednoho segmentu permanentního magnetu. Na obr. 4 je příklad provedení rotoru SPMSM ze servomotoru 3 kW pro rychlost 40 000 ot/min.



Obr. 3 Příklad provedení segmentu permanentního magnetu



Obr. 4 Příklad provedení rotoru motoru SPMSM

Permanentní magnety s vysokou magnetickou indukcí dávají synchronním motorům příznivé vlastnosti ve srovnání s asynchronními motory. Jedná se především o tyto výhody:

- 2x až 4x menší objem oproti asynchronnímu motoru při stejném výkonu a stejných otáčkách, s tím související menší moment setrvačnosti motoru
- Velká momentová přetížitelnost – 3x až 4x
- Vyšší účinnost oproti asynchronnímu motoru o nižší jednotky % v důsledku absence vinutí rotoru a Jouleových ztrát v rotoru

Malý objem synchronních motorů s permanentními magnety vyžaduje účinný odvod ztrátového tepla, z toho důvodu se, především v případě motorů středních a vyšších výkonů pro dopravní prostředky, používá vodní chlazení. U synchronních motorů s permanentními magnety se obecně zhoršují podmínky pro odvod ztrátového tepla i z důvodu nutného zapouzdření, aby nedocházelo k zachytávání magnetických nečistot na rotorových magnetech.

U synchronních servomotorů bez vodního chlazení lze proto odvádět ztrátové teplo pouze konvekci přes konstrukci motoru.

Výrazné snížení rozměrů motoru oproti asynchronnímu motoru umožňuje prakticky použitelnou realizaci pomaluběžných motorů s permanentními magnety pro vysoké momenty. Použití pomaluběžných motorů umožňuje realizaci přímých, bezpřevodkových pohonů, které se využívají u některých dopravních prostředků, například u tramvaji (obr. 5).



5 Individuální bezpřevodkový pohon kola tramvaje pomaluběžným vysokomomentovým synchronním motorem s permanentními magnety s vodním chlazením

Synchronní motory s permanentními magnety mají ve srovnání s asynchronními motory méně příznivou cenu v důsledku ceny permanentních magnetů ze speciálních slitin.

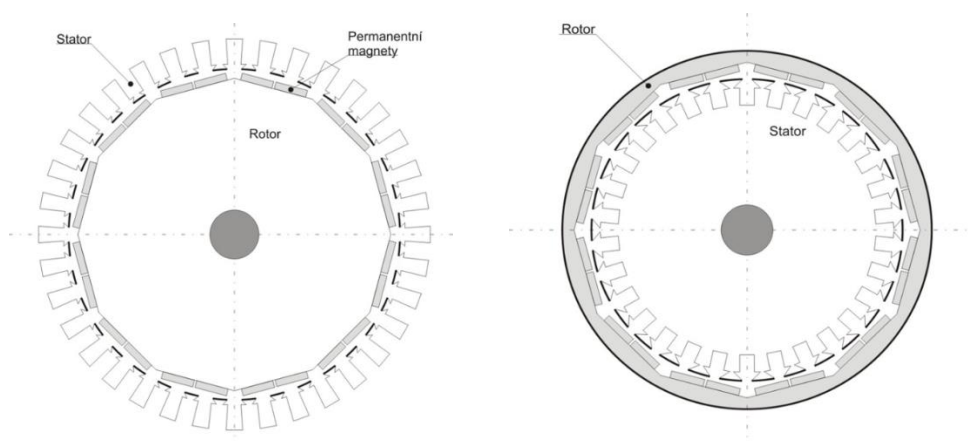
Specifickou vlastností synchronního motoru s permanentními magnety je stálé nabuzení – stálá přítomnost magnetického toku. Tato vlastnost se zohledňuje především při konstrukci trakčních pohonů, kde je potřebné zajistit možnost elektrického nebo mechanického odpojení motoru pro případ poruchy, zejména zkratu, v trakčním obvodu vozidla. Při tažení poškozeného vozidla by se otáčející se motor choval jako nabuzený generátor a generoval by do poruchy – zkratu proudy, které by způsobovaly tepelné namáhání komponent elektrického obvodu a momentové rázy. Elektrické nebo mechanické odpojení motoru v tomto případě uvedeným nežádoucím jevům zabrání.

Stálé nabuzení motoru je rovněž příčinou generování ztrát v železném magnetickém obvodu statoru v případě výběhu pohonu.

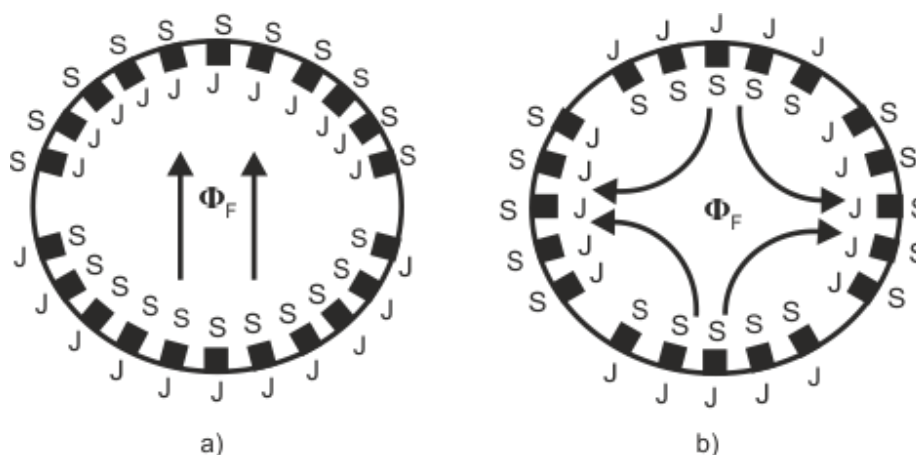
Synchronní motory s permanentními magnety mají zpravidla konvenční konstrukci tvořenou státorem, uvnitř něho je umístěn rotor. Malé zástavbové rozměry synchronních motorů s permanentními magnety však u některých dopravních prostředků umožňují jejich integraci do kol vozidla. V tomto případě je na ose kola umístěn třífázový stator, který je obepínán rotorem s permanentními magnety umístěným na kole. Obě koncepce motorů jsou znázorněny na obr. 6.

Nejobvyklejším řešením synchronních motorů s permanentními magnety je motor SPMSM (synchronní motor s povrchovými magnety). Segmenty magnetů jsou u této konstrukce motoru nalepeny na rotor a tvoří **magnetické póly**. U **vícepólových strojů se orientace magnetických pólů střídá** podle toho, zda jsou segmenty magnetů umístěny na rotor vně severním nebo vně jižním pólem. Motory SPMSM vykazují velkou **magnetickou symetrií rotoru**, obdobně jako motory s budicím vinutím s hladkým rotorem. Na obr. 7 je principiálně znázorněna konstrukce rotoru dvoupólového (obr. a)) a čtyřpólového (obr. b))

SPMSM. Na obrázku je znázorněna orientace magnetických siločar, jedná se o analogii orientace magnetického pole u asynchronních motorů s různými počty pólů.



Obr. 6 Konvenční konstrukce synchronního motoru s vnitřním rotorem a alternativní konstrukce s vnějším rotorem



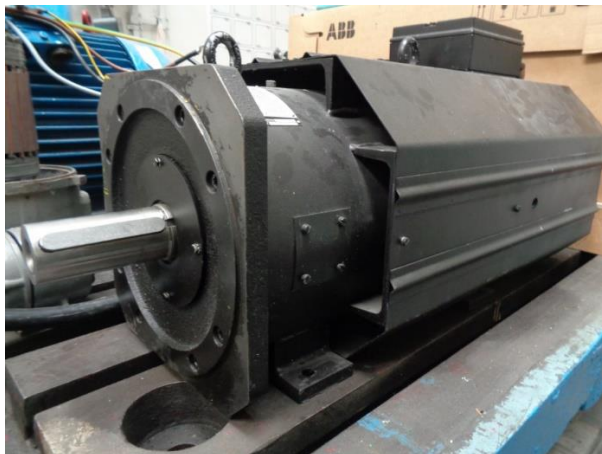
Obr. 7 Řešení dvoupólového a čtyřpólového rotoru SPMSM

Na obr. 8 je příklad provedení SPMSM 100 kW, 5000 ot/min s vlastním vzduchovým chlazením. Na obr. 9 je příklad provedení synchronního servomotoru s permanentními magnety 5 kW s odvodem ztrátového tepla z motoru konvekci.

Perspektivním řešením synchronních motorů s permanentními magnety jsou motory IPMSM. U této konstrukce jsou permanentní magnety zapuštěny do feromagnetického materiálu rotoru. Konkrétní konstrukce IPMSM se využívá v řadě variant. Na obr. 10 a 11 jsou znázorněny dvě z možných variant konstrukce rotoru IPMSM, vždy pro dvoupólový motor (obr. a)) a pro čtyřpólový motor (obr. b)).

Pro motory IPMSM je charakteristická **magnetická nesymetrie rotoru**, tj. rozdílný magnetický odpor rotoru v osách d a q podle obr. 10 a 11. U motorů IPMSM vykazuje zpravidla menší magnetickou vodivost směr osy d, tedy směr působení magnetických siločar permanentního magnetu. To je dáno menší magnetickou vodivostí permanentního magnetu, sycením feromagnetika magnetického obvodu ve směru siločar magnetického pole permanentního magnetu a celkovým geometrickým uspořádáním. Konstrukce IPMSM je komplikovanější oproti motorům SPMSM, výrazně komplikovanější je i regulace IPMSM oproti SPMSM. Magnetická nesymetrie rotoru IPMSM má však příznivé dopady na

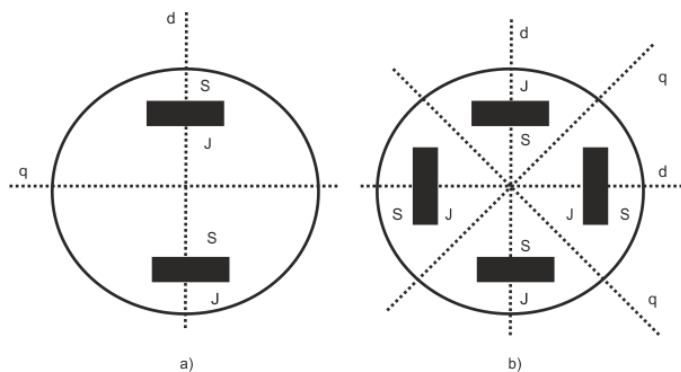
momentové a výkonové vlastnosti motoru – přispívá ke zvýšení momentu. IPMSM proto představují skupinu elektrických točivých strojů, kde se dosahuje nejvyšších objemových koncentrací výkonu, současně se jedná o typ elektrických točivých strojů, kde se dosahuje nejvyšších účinností až do 97%. Podrobnější výklad momentových vlastností motorů IPMSM je uveden v dalším textu.



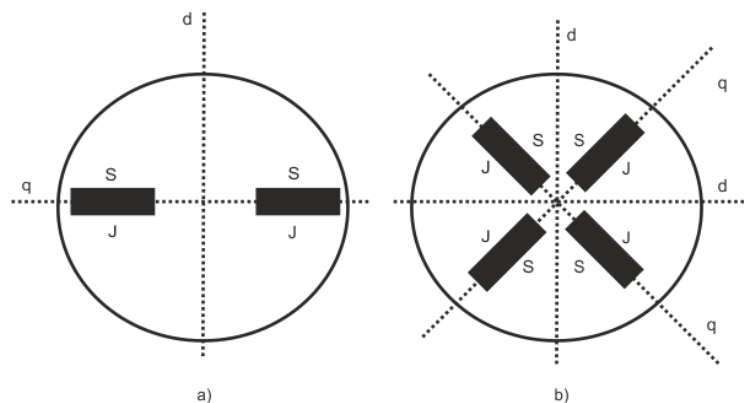
Obr. 8 Příklad provedení SPMSM 100 kW, 5000 ot/min



Obr. 9 Příklad provedení synchronního servomotoru s permanentními magnety 5 kW



Obr.10 Možná varianta řešení konstrukce rotoru IPMSM, dvoupólový rotor (a)) a čtyřpólový rotor (b))



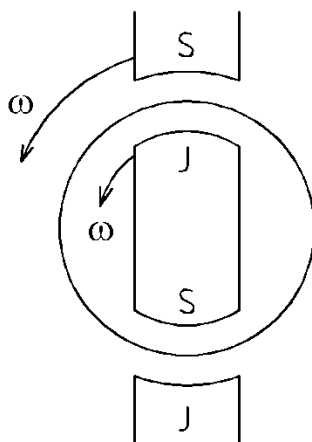
Obr. 11 Možná varianta řešení konstrukce rotoru IPMSM, dvoupólový rotor (a)) a čtyřpólový rotor (b))

2. Princip funkce synchronních strojů

Princip funkce synchronního motoru je založen na **vzájemném působení magnetického točivého pole statoru a magnetického pole od rotorového zdroje** (budicího vinutí nebo permanentních magnetů). Rychlost otáčení točivého magnetického pole, tj. synchronní rychlost, resp. synchronní úhlová rychlost ω_s , je dána, stejně jako u asynchronního motoru, vztahem (10.6). V nejjednodušším případě dvoupólového stroje si lze točivé magnetické pole statoru představit zjednodušeně jako dvojici rotujících magnetických pólů, tj. rotující magnet. Mezi statorovým magnetickým polem, tj. fiktivním statorovým rotujícím magnetem a zdrojem magnetického toku na rotoru se vytvoří magnetická vazba, statorový severní pól přitáhne jižní pól rotoru, statorový jižní pól přitáhne severní pól rotoru. Situace je znázorněna na obr. 12. **Točivé magnetické pole potom unáší rotor v synchronismu, v ustáleném stavu je tedy úhlová rychlost otáčení rotoru synchronního stroje ω_m rovna úhlové rychlosti otáčení točivého magnetického pole** (synchronní úhlové rychlosti ω_s). Platí tedy vztah:

$$\omega_m = \omega_s = \omega = \frac{\omega_1}{p_p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p_p} \quad (2)$$

Ve vztahu (2) značí p_p počet pólových dvojic stroje, který je u synchronního stroje podle vztahu (1) stejný na statoru i rotoru, ω_1 je úhlová frekvence napětí a proudu statorového vinutí a f_1 je frekvence proudu a napětí statoru.



Obr. 12 K vysvětlení principu funkce synchronního stroje

Magnetická vazba mezi statorovým točivým magnetickým polem a magnetickým polem rotoru se stabilně nevytvoří, jestliže bychom synchronní motor připojili přímo na napájecí síť například s frekvencí 50 Hz. **Do synchronismu vstoupí rotor se statorovým polem jen při velmi malém rozdílu rychlosti rotoru a točivého magnetického pole.** Proto se synchronní stroje musí rozbíhat buď pomocí roztočení dalším strojem do blízkosti synchronních otáček (například generátory v elektrárnách) nebo při napájení ze zdroje s proměnnou frekvencí při postupném zvyšování frekvence (například motory s permanentními magnety v automatizační nebo dopravní technice).

Pracuje-li synchronní stroj jako generátor, platí také rovnost mechanické a synchronní rychlosti podle vztahu 2. **V generátorickém režimu je vnitřním napětím tohoto zdroje indukované napětí ve statorovém vinutí u_i .** V ideálním případě má toto indukované napětí harmonický průběh s frekvencí f_1 podle vztahu (2). **Vznik indukovaného napětí ve statorovém vinutí je dán časovou změnou magnetického toku rotoru Φ_F** (od permanentních magnetů nebo od budicího vinutí rotoru) **v cívkách statoru v důsledku otáčení rotoru** podle Faradayova indukčního zákona. Stejně jako u stejnosměrného stroje působí také u synchronního stroje indukované napětí v generátorickém i motorickém režimu. V podmínkách synchronního stroje lze pro efektivní hodnotu indukovaného napětí ve vinutí fáze psát vztah:

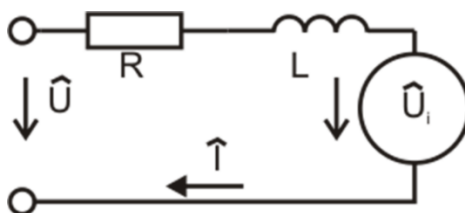
$$U_i = N \cdot \Phi_F \cdot \omega_1 = \Psi_f \cdot \omega_m \cdot p_p \quad (3)$$

Ve vztahu (3) značí $\Psi_f = N \cdot \Phi_F$ spřažený magnetický tok rotorových permanentních magnetů nebo budicího vinutí. Efektivní hodnota indukovaného napětí statoru synchronního stroje závisí tedy přímo úměrně na magnetickém toku rotorového zdroje a na rychlosti otáčení rotoru.

3. Vlastnosti synchronního stroje s magnetickou symetrií rotoru

Názornější a jednodušší je popis vlastností synchronního stroje s magnetickou symetrií rotoru, jedná se tedy o stroje s budicím vinutím s hladkým rotorem a o stroje SPMSM. Pro takového stroje platí, že mají **přibližně stejný magnetický odpor rotoru ve všech směrech (úhlech).**

Na obr. 13 je uvedeno náhradní schéma jedné fáze statorového vinutí synchronního stroje s magnetickou symetrií rotoru. Stator synchronního stroje se označuje někdy také jako kotva, neboť kotvou elektrického stroje je ta část, kde se indukují napětí.



Obr. 13. Náhradní schéma jedné fáze statorového vinutí synchronního stroje s magnetickou symetrií rotoru

Na obr. 13 značí:

U - fázor svorkového fázového napětí statorového vinutí

I - fázor proudu fáze statoru

R - odpor vinutí fáze statoru

L - indukčnost vinutí fáze statoru

U_i - fázor indukovaného napětí

Z náhradního schématu na obr. 13 resp. z odpovídajícího fázorového diagramu lze odvodit základní vztah pro moment synchronního stroje s magnetickou symetrií rotoru v ustáleném stavu při zavedení dvou zjednodušujících předpokladů:

- Zanedbává se vliv odporu statorového vinutí, $R \rightarrow 0$.
- Zanedbává se vliv ztrát ve stroji, tedy je uvažována rovnost výkonu a příkonu stroje, $P = P_p$.

Při zanedbání ztrát ve stroji lze pro jeho výkon, tedy i příkon, psát následující vztah:

$$P_n = P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4)$$
$$CD = U_j \cdot \sin\beta = \omega_1 \cdot L \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (5)$$

Po dosazení ze vztahu (5) do vztahu (4) lze pro výkon stroje psát vztah:

$$P = 3 \cdot U \cdot U_i \cdot \frac{1}{\omega_1 \cdot L} \cdot \sin \beta \quad (6)$$

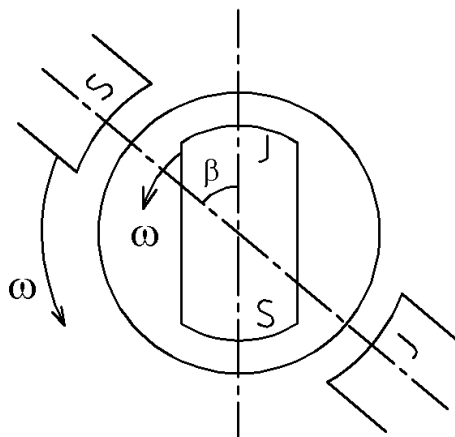
$$M = \frac{P}{\omega} = 3 \cdot \frac{p_p}{\omega_1} \cdot \frac{U \cdot U_i}{\omega_1 \cdot L} \cdot \sin\beta \quad (7)$$

Výše uvedený vztah byl odvozen pomocí fázorového diagramu pro motorický režim, odvození pro generátorický režim lze provést analogicky, získá se pak totožný výraz pro moment (7). Součin $\omega_1 \cdot L = X_d$ udává reaktanci stroje. Ze vztahu (7) tedy vyplývá, že moment synchronního stroje je přímo úměrný efektivní hodnotě svorkového napětí statoru U a nepřímo úměrný reaktanci X_d . Podíl U_i/ω_1 udává v kontextu se vztahem (3) lineární závislost mezi momentem a spráženým magnetickým tokem Ψ_f rotoru. Dále podle vztahu (7) závisí moment synchronního stroje s magnetickou symetrií rotoru na sinu úhlu β . Úhel β je typickou veličinou synchronního stroje a nazývá se **zátěžný úhel**. Podle fázorového diagramu na obr. 14 je β v elektrické reprezentaci **fázový posun mezi fázorem svorkového napětí U statoru a fázorem indukovaného napětí U_i** . Zátěžný úhel β lze rovněž reprezentovat mechanicky. Vysvětlení této reprezentace vychází z obr. 12. Rotor synchronního stroje se zde udržuje

v synchronismu s točivým magnetickým polem statoru v důsledku magnetické vazby. Začneme-li se rotor ze stavu na obr. 2 zatěžovat mechanickým momentem v motorickém režimu, začne se rotor úhlově zpožďovat za statorovým točivým polem o mechanický úhel β_{mech} . Pro dvoupólové stroje platí číselná rovnost mechanicky reprezentovaného úhlu β_{mech} a elektricky reprezentovaného úhlu β . Pro vícepólové stroje platí mezi číselnými hodnotami takto vyjádřených úhlů vztah zohledňující počet pólových dvojic p_p :

$$\beta_{\text{mech}} = \frac{\beta}{p_p} \quad (8)$$

Mechanická reprezentace zátěžného úhlu β u dvoupólového synchronního stroje je zřejmá z obr. 15.

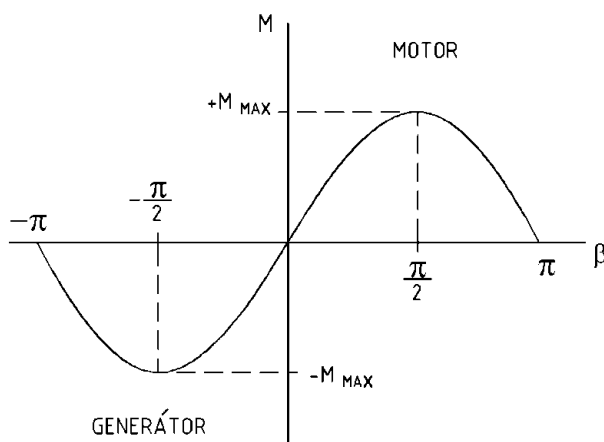


Obr. 15 Mechanická reprezentace zátěžného úhlu

Sinusová závislost momentu M synchronního stroje s magneticky symetrickým rotorem na zátěžném úhlu β podle vztahu (7) je graficky znázorněna na obr. 16. S rostoucím zatěžovacím momentem roste zátěžný úhel β podle sinusového průběhu, **maximálního momentu je dosaženo při úhlu $\beta = 90^\circ$** . Při dalším zvyšování momentu zátěže nad maximální hodnotou momentu stroje M_{MAX} odpovídající úhlu $\beta = 90^\circ$ by se pracovní bod stroje dostal na charakteristice $M = f(\beta)$ na klesající část pro $\beta > 90^\circ$. Prakticky to však znamená, že při tomto momentovém přetížení se přeruší magnetická vazba mezi točivým magnetickým polem statoru a magnetickým zdrojem rotoru, stroj ztratí moment a zastaví se. Tento jev se nazývá **vypadnutím ze synchronismu** a jedná se o havarijní stav. Nebezpečí vypadnutí ze synchronismu je reálné u velkých synchronních strojů, které pracují připojené přímo na napájecí síti s konstantní frekvencí a efektivní hodnotou napětí. U těchto strojů se při provozu musí indikovat hodnota zátěžného úhlu β a při dosažení její kritické hodnoty v blízkosti 90° se musí učinit příslušná opatření (odlehčení nebo odstavení stroje). Synchronní stroje pro automatizační techniku a dopravní techniku jsou vždy provozovány s frekvenčním řízením a zpětnovazební regulací. Tento způsob provozu a řízení zabezpečí, že stroj nemůže vypadnout ze synchronismu, neboť při nepřiměřeném zvýšení zátěžného momentu, kdy se rotor začne zpomalovat, zabezpečí zpětná vazba ve spojení s frekvenčním řízením současně snižování frekvence napájecího napětí statorového vinutí, stroj je tedy v případě přetížení udržen v synchronismu až do případného zastavení.

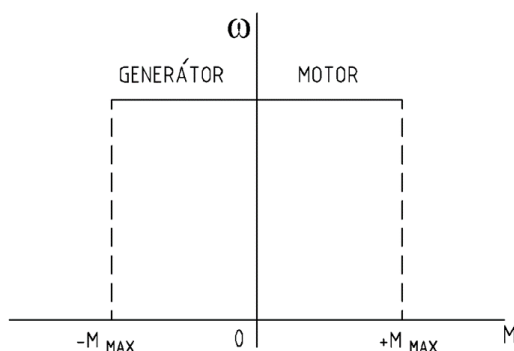
Závislost na obr. 16 je vynesena i pro záporné hodnoty úhlu β . V této oblasti předbíhá rotor před točivým magnetickým polem statoru o úhel β . Jedná se o **generátorický režim**. U neregulovaných synchronních strojů, především generátorů pro výrobu elektrické energie, existuje rovněž riziko vypadnutí za synchronismu při překročení absolutní hodnoty momentu M_{MAX} v generátorické oblasti. V případě vypadnutí ze synchronismu v generátorické oblasti stroj rovněž ztratí moment, tj. mechanické hnací soustrojí ztratí brzdný protimoment a dojde

k jeho nekontrolované akceleraci. Jedná se rovněž o havarijní stav, který musí být ošetřen příslušnými ochranami. U regulovaných strojů eliminuje riziko vypadnutí ze synchronismu v generátorickém režimu zpětná vazba, obdobně jako v motorickém režimu.



Obr. 16 Závislost momentu M na zátěžném úhlu β synchronního stroje s magnetickou symetrií rotoru

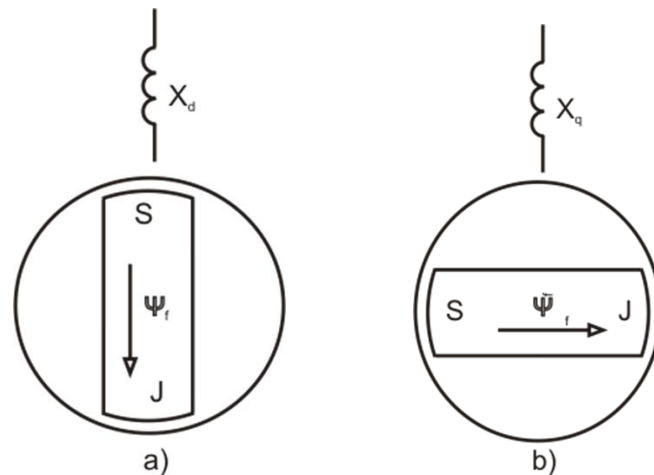
Na obr. 17 je znázorněna mechanická charakteristika synchronního stroje jako funkce $\omega_m = f(M)$. Mechanická úhlová rychlost ω_m je u synchronního stroje dána vztahem (2), tato rychlost nezávisí na momentu a mechanická charakteristika $\omega_m = f(M)$ je tedy dána úsečkou rovnoběžnou s momentovou osou. Úsečka je omezena hodnotami maximálního momentu M_{MAX} v motorickém a v generátorickém režimu. **Mechanická charakteristika**, u které nezávisí ω_m na momentu, se označuje jako **absolutně tvrdá**.



Obr. 17 Mechanická charakteristika synchronního stroje

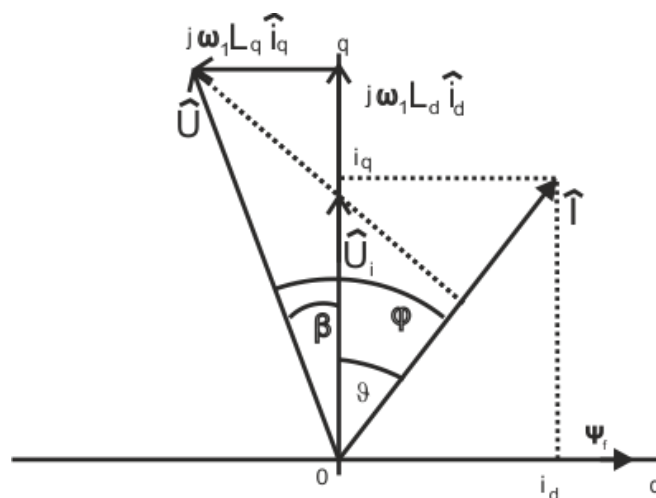
4. Vlastnosti synchronního stroje s magnetickou nesymetrií rotoru

Praktické dopady magnetické nesymetrie rotoru synchronního stroje se projevují ve velké míře z hlediska momentových vlastností. Magnetická nesymetrie rotoru se uplatňuje u strojů s budícím vinutím s vyniklými póly a v převážné míře u strojů s vnořenými permanentními magnety (IPMSM). **Magnetická nesymetrie rotoru způsobuje proměnnou hodnotu indukčnosti statorových vinutí, indukčnosti statorových vinutí se u těchto strojů mění v závislosti na úhlovém natočení rotoru.** Tento princip je zřejmý z obr. 18.



Obr. 18 K vysvětlení změny indukčnosti satorového vinutí u strojů s magnetickou nesymetrií rotoru

Na obr. 18 a) je znázorněn případ dvoupólového stroje, kdy je vyšetřována indukčnost satorového vinutí při natočení rotoru vůči sledované satorové cívice tak, že magnetický tok satorové cívky překonává minimální magnetický odpor daný převážně vzduchovými mezerami mezi satorovou a rotorovou částí magnetického obvodu. Při natočení rotoru podle obr. 18 a) lze předpokládat, že satorová cívka bude mít indukčnost L_d a odpovídající reaktanci $X_d = \omega_1 \cdot L_d$. Jedná se o tzv. **podélnou indukčnost, resp. reaktanci**. Po otočení rotoru o 90° se magnetický odpor dráhy magnetického toku sledované satorové cívky zvětší v důsledku zvětšení vzduchové mezery, v tomto stavu tedy musí magnetický tok satorové cívky překonávat větší magnetický odpor vzduchu. Při tomto úhlovém natočení rotoru má cívka satoru indukčnost L_q a jí odpovídající reaktanci $X_q = \omega_1 \cdot L_q$. Jedná se o tzv. **příčnou indukčnost, resp. reaktanci**. Indukčnost cívky je nepřímě úměrná magnetickému odporu, pro případ znázorněný na obr. 18 bude tedy platit nerovnost $L_d > L_q$. Při otáčení rotoru se tedy bude indukčnost sledované cívky satoru měnit mezi hodnotami L_d a L_q . V závislosti na konstrukci rotoru může obecně platit i opačná nerovnost, tedy $L_q > L_d$. Speciálním případem jsou pak stroje s magneticky symetrickým rotorem, kde platí $L_d = L_q$.



Obr. 19 Fázorový diagram synchronního stroje s magnetickou nesymetrií na rotoru

Na obr. 19 je fázorový diagram synchronního stroje s magnetickou nesymetrií rotoru. Pomocí tohoto fázorového diagramu lze odvodit vztah pro moment synchronního stroje s magnetickou nesymetrií rotoru. Konstrukce fázorového diagramu vychází z podobných principů, jako u konstrukce fázorového diagramu stroje s magnetickou symetrií rotoru na obr. 14. Stejně jako v případě odvození momentu stroje s magnetickou symetrií rotoru se zde zanedbává vliv odporu statorového vinutí, $R \rightarrow 0$. Fázor Ψ_f označuje spřažený magnetický tok rotorového magnetického zdroje, U_i je fázor indukovaného napětí, který je kolmý na Ψ_f . Podle obr. 19 lze pro vzájemnou relaci mezi úhly psát vztah:

$$\varphi = \vartheta + \beta \quad (9)$$

V analogii se strojem s magnetickou symetrií rotoru lze při zanedbání ztrát stroje vyjít při odvození vztahu pro moment ze vztahu pro činný výkon a dále uvažovat podmínky stroje s magnetickou nesymetrií rotoru podle fázorového diagramu na obr. 19:

$$P_p = P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos(\vartheta + \beta) = 3 \cdot U \cdot I \cdot (\cos\vartheta \cdot \cos\beta - \sin\vartheta \cdot \sin\beta) \quad (10)$$

V dalším kroku odvození se fázor proudu statoru I rozloží na dvě pravoúhlé složky – složka i_d je rovnoběžná se spřaženým magnetickým tokem rotoru Ψ_f , složka i_q je rovnoběžná s fázorem indukovaného napětí U_i . Pro složky proudu pak lze psát:

$$i_d = I \cdot \sin\vartheta \quad i_q = I \cdot \cos\vartheta \quad (11)$$

Uvedené složky proudu i_d a i_q způsobují odpovídající úbytky napětí na indukčnostech L_d a L_q , které předbíhají korespondující proudy o 90° :

$$u_{Ld} = \omega_1 \cdot L_d \cdot I \cdot \sin\vartheta \quad u_{Lq} = \omega_1 \cdot L_q \cdot I \cdot \cos\vartheta \quad (12)$$

Z trojúhelníku tvořeného na obr. 19 fázorem svorkového napětí U , fázorem indukovaného napětí U_i a úbytky napětí na indukčnostech u_{Ld} a u_{Lq} lze vyjádřit následující vztahy:

$$U \cdot \sin\beta = \omega_1 \cdot L_q \cdot I \cdot \cos\vartheta = X_q \cdot I \cdot \cos\vartheta \quad (13)$$

$$U \cdot \cos\beta = U_i + \omega_1 \cdot L_d \cdot I \cdot \sin\vartheta = U_i + X_d \cdot I \cdot \sin\vartheta \quad (14)$$

Po dosazení vztahů (13) a (14) do vztahu (10) lze psát:

$$P = 3 \cdot U \cdot \frac{U}{X_q} \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta - 3 \cdot U \cdot \frac{U \cdot \cos\beta - U_i}{X_d} \cdot \sin\beta \quad (15)$$

Platí obecný vztah:

$$\sin\beta \cdot \cos\beta = \frac{1}{2} \cdot \sin 2 \cdot \beta \quad (16)$$

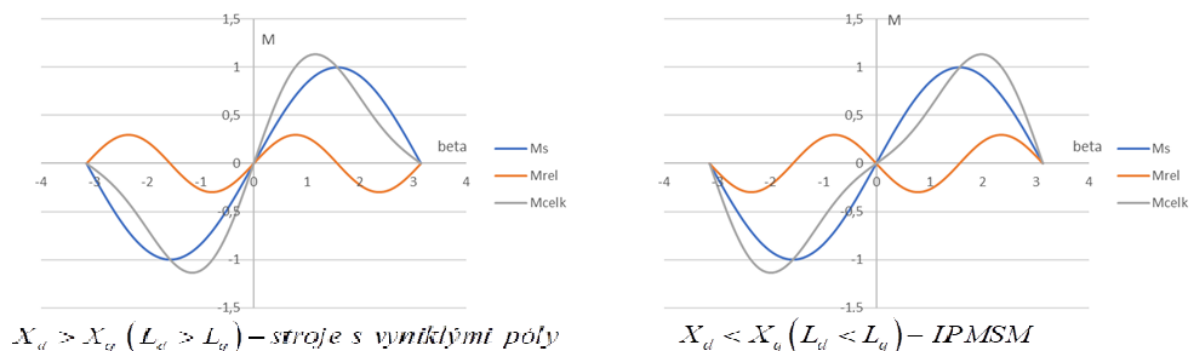
Po dosazení vztahu (16) do vztahu (15) a úpravě lze psát:

$$P = 3 \cdot \frac{U \cdot U_i}{X_d} \cdot \sin\beta + 3 \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2 \cdot \beta \quad (17)$$

Ze vztahu (17) lze pro moment M psát:

$$M = \frac{P}{\omega_m} = \frac{P \cdot p_p}{\omega_1} = 3 \cdot \frac{p_p}{\omega_1} \cdot \frac{U \cdot U_i}{X_d} \cdot \sin\beta + 3 \cdot \frac{p_p}{\omega_1} \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2 \cdot \beta = M_{syn} + M_{rel} \quad (18)$$

Z výsledného vztahu (18) pro moment synchronního stroje s magnetickou nesymetrií rotoru je zřejmé, že moment tohoto stroje se skládá ze dvou složek: složka M_{syn} - synchronní moment, je stejná jako u stroje s magnetickou symetrií rotoru, Jedná se tedy o složku, která je přímo úměrná spřaženému magnetickému toku rotoru Ψ_f . Druhá složka M_{rel} je reluktanční moment. Ze vztahu (18) je zřejmé, že podmínkou vzniku této složky jsou rozdílné hodnoty X_d a X_q , resp. L_d a L_q , tedy magnetická nesymetrie rotoru. Ze vztahu (18) plyne, že reluktanční složka momentu se zvyšuje s rostoucí magnetickou nesymetrií rotoru, tedy s rostoucím rozdílem X_d a X_q . Reluktanční složka momentu nevyužívá spřažený magnetický tok rotoru Ψ_f . Zároveň je reluktanční složka momentu závislá na $\sin 2\beta$, maximum reluktanční složky momentu tedy nastává při úhlu 45° .



Obr. 20 Závislosti momentu synchronního stroje na zátěžném úhlu

Na obr. 20 jsou průběhy závislosti momentu M na zátěžném úhlu β (elektrická reprezentace úhlu) pro synchronní stroje s magnetickou nesymetrií rotoru. Na obr. vlevo je případ pro $L_d > L_q$, kde se maximum momentu vyskytuje pro úhel $\beta < 90^\circ$ (stroje s budičím vinutím s vyniklými póly), na obr. vpravo je případ pro $L_d < L_q$ (zpravidla stroje IPMSM), kde se maximum momentu vyskytuje pro úhel $\beta > 90^\circ$.

Reluktanční moment zvyšuje celkový moment stroje, zvyšuje výkon stroje a přispívá k vyšší účinnosti motoru. Z toho důvodu se v současnosti jako velice perspektivní jeví motory IPMSM (pro mobilní aplikace), u nichž je v pracovní oblasti dosahováno účinnosti přes 95%.

5 Řízení synchronních motorů

Regulované pohony se synchronními motory se v největší míře používají v servotechnice pro průmyslovou automatizaci a v trakčních aplikacích. V těchto oblastech se v převážné většině případů používají synchronní motory s permanentními magnety.

Synchronní motory se řídí výhradně změnou frekvence napájecího napětí a výhradně ve spojení se zpětnovazební regulační strukturou. Frekvenční řízení synchronních motorů se zpětnou vazbou zajišťuje dobré využití stroje regulací zátěžného úhlu, ve spojení s regulací proudu je poté dosaženo regulace momentu. Změna frekvence zajišťuje přímo úměrnou změnu mechanické úhlové rychlosti a zpětná vazba zabezpečuje motor proti ztrátě synchronismu. Podrobný výklad regulačních metod synchronních motorů je nad rámec tohoto učebního textu. **Při zpětnovazební regulaci synchronního motoru je však nezbytné průběžné vyhodnocování úhlového natočení rotoru.** Z toho důvodu jsou regulované synchronní motory vybavovány snímačem úhlového natočení, který je velice často integrovaný v konstrukci motoru. U některých pohonů s menšími nároky na kvalitu regulace se používají bezsenzorové metody vyhodnocování úhlového natočení rotoru, hodnoty úhlového natočení jsou zde získávány sofistikovanými výpočetními postupy v reálném čase v kombinaci s injekcí identifikačních signálů do statorového vinutí.

Konstrukce a principy funkce výkonových měničů pro frekvenční řízení synchronních motorů jsou stejné jako u asynchronních motorů – obr. 10.21 až 10.24. Akčním členem ve zpětnovazební regulační struktuře synchronního motoru je třífázový střídač podle obr. 10.22. Průběhy proudů a napětí jsou formovány pomocí širkově pulsní modulace podle obr. 10.23 a 10.24.

Vnější vlastnosti frekvenčně řízeného synchronního motoru jsou obdobné jako u frekvenčně řízeného asynchronního motoru podle obr. 10.19, tj. s rostoucí frekvencí se přibližně přímo úměrně zvyšuje efektivní hodnota napětí až do dosažení jmenovité frekvence, při dalším zvyšování frekvence nastává režim odbuzování a s rostoucí frekvencí v této oblasti

zůstává efektivní hodnota napětí konstantní rovná jmenovité hodnotě. U synchronních strojů s permanentními magnety se odbuzování dosahuje zeslabování celkového magnetického toku ve stroji pomocí magnetizačních účinků jalové složky proudu statoru, které jsou směřovány proti magnetickému toku permanentních magnetů na rotoru. Obdobně jako u asynchronního motoru zde s rostoucí frekvencí v odbuzování klesá moment.

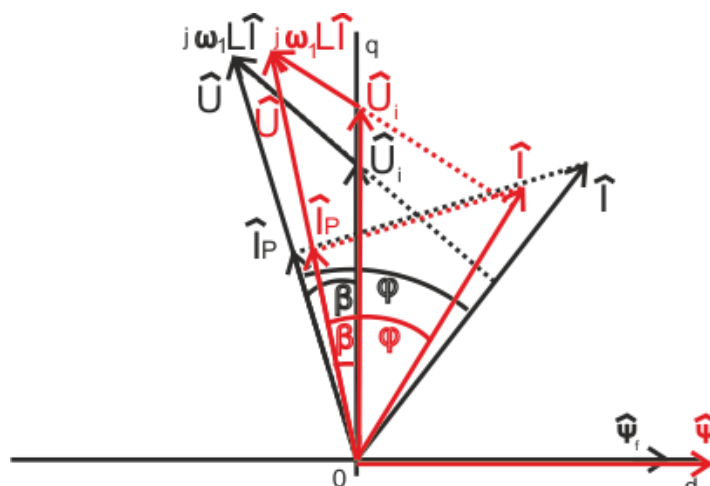
6. Řízení jalového výkonu synchronního stroje

Jak bylo uvedeno v kapitole 10, asynchronní motor odebírá při svém provozu z napájecího zdroje jalovou složku proudu a účinník se v tomto případě neblíží 1. To je dáno skutečností, že jalová složka proudu statoru asynchronního motoru se využije k vytvoření magnetického toku, který je nezbytný pro vytvoření momentu. U synchronního stroje je magnetický tok vytvářen rotorovým budicím zdrojem, jalový výkon statorového vinutí a jeho účinník jsou říditelné u strojů s permanentními magnety prostřednictvím zpětnovazební regulace a u strojů s budicím vinutím prostřednictvím řízení budicího proudu. Postupy, které budou popsány v této podkapitole, je možné realizovat u strojů s budicím vinutím na rotoru. Principy tohoto řízení se uplatňují podobně v režimu motorickém i generátorickém. V dalším textu budou objasněny tyto principy pro případ motorického režimu.

Předpokládejme následující situaci:

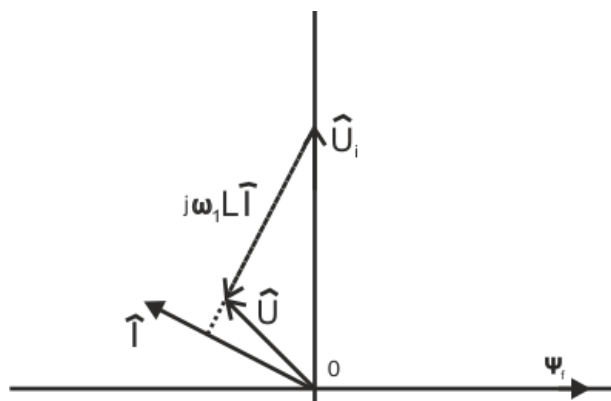
- Stroj s hladkým rotorem.
- Konstantní frekvence napájecího napětí statoru f_1 , tj. konstantní úhlová frekvence napájecího napětí statoru ω_1 a konstantní mechanická úhlová rychlost rotoru ω_m .
- Konstantní efektivní hodnota napájecího napětí statoru U .
- Konstantní moment motoru M .
- Zanedbávají se ztráty motoru, tj. $\Delta P \rightarrow 0$, $P_p = P$.
- Při konstantním momentu a rychlosti je konstantní výkon a činný příkon motoru, $P = \text{konst.}$
- Náhradní schéma statorového obvodu podle obr. 13, zanedbává se vliv odporu statorového vinutí R .
- Při konstantní efektivní hodnotě napájecího napětí U a konstantním činném příkonu je konstantní činná složka proudu statoru I_p .

Sledujme nyní, jaké bude chování motoru za výše uvedených předpokladů při zvýšení budicího proudu I_f . **V důsledku zvýšení budicího proudu se zvýší spřažený magnetický tok** rotorového budicího vinutí Ψ_f a podle vztahu (3) se rovněž **zvětší efektivní hodnota indukovaného napětí U_i** . Zvětšení efektivní hodnoty indukovaného napětí U_i je při konstantní efektivní hodnotě napájecího napětí statorového vinutí U příčinou **snížení úbytku napětí na indukčnosti statorového vinutí $\omega_1 L I$** . V důsledku zmenšení velikosti tohoto úbytku napětí se **zmenší také efektivní hodnota proudu statorového vinutí I a velikost zátěžného úhlu β** . Při stálé velikosti činné složky statorového proudu I_p a snížení celkové efektivní hodnoty proudu I dojde **ke zmenšení úhlu ϕ mezi fázorem proudu statoru I a fázorem napětí statoru U** . Nutně tím tedy dojde **ke snížení velikosti induktivního jalového výkonu**, se kterým stroj pracuje a **ke zvýšení účinníku $\cos\phi$** . Je tedy zřejmé, že **změnou budicího proudu I_f synchronního stroje lze měnit velikost jalového výkonu statorového vinutí a velikost účinníku**. Popsaná situace je znázorněna na fázorovém diagramu na obr. 21. Na tomto obrázku je černou barvou vyznačen fázorový diagram statorového vinutí odpovídající výchozímu stavu. Tento fázorový diagram je stejný jako na obr. 14. Červenou barvou je na obr. 21 znázorněn fázorový diagram odpovídající situaci při zvýšení budicího proudu I_f .



Obr. 21 K vysvětlení řízení jalového výkonu synchronního stroje

Výše uvedené úvahy je možno dále zobecnit. Při dalším zvyšování budicího proudu I_f v kontextu s vlastnostmi synchronního stroje znázorněnými na obr. 21 se dále bude zmenšovat úhel φ , induktivní jalový výkon a zátěžný úhel β , bude se zvyšovat účinník. Při určité hodnotě budicího proudu I_f pak dojde ke stavu, kdy bude fázor proudu vinutí statoru I rovnoběžný s fázorem napětí statorového vinutí U , stroj bude pracovat s nulovým jalovým výkonem a účinníkem $\cos \varphi = 1$. Při dalším zvyšování budicího proudu I_f se bude fázor proudu vinutí statoru I dále otáčet proti směru hodinových ručiček a začne předbíhat fázor napětí statorového vinutí U , tj. synchronní stroj začne mít **kapacitní charakter**, bude dodávat kapacitní jalový výkon, stroj bude v tzv. přebuzeném stavu. Fázorový diagram odpovídající přebuzenému stavu je na obr. 22.



Obr. 22 Fázorový diagram synchronního stroje v přebuzeném stavu (kapacitní charakter)

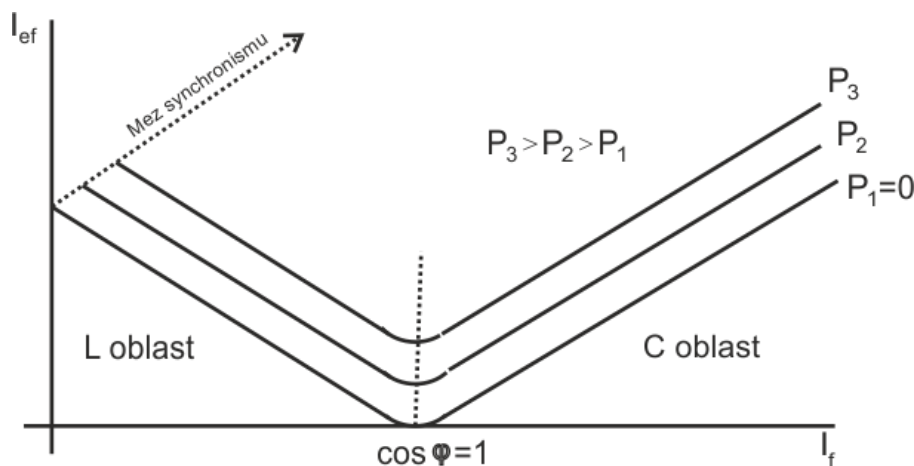
Z výše uvedeného popisu vyplývá, že **změnou budicího proudu I_f synchronního stroje (v motorickém i generátorickém režimu) lze měnit velikost jeho jalového výkonu a účinníku a to i z hlediska charakteru jeho jalového výkonu, synchronní stroj tedy může pracovat s induktivním charakterem, kapacitním charakterem i s nulovým jalovým výkonem, kdy je účinník $\cos \varphi = 1$** . Synchronní motory, zpravidla vysokých výkonů, které jsou napájeny přímo ze sítě, se provozují zpravidla při $\cos \varphi = 1$ nebo v přebuzeném stavu. To má pozitivní dopad i na momentové vlastnosti stroje – s vyšším budicím proudem I_f dosahuje stroj vyššího momentu.

V dřívější době se možnosti regulace jalového výkonu synchronního stroje budicím proudem využívalo u tzv. synchronních kompenzátorů. Jednalo se o synchronní stroje, které pracovaly s nulovým činným výkonem a pomocí řízení budicího proudu se dosahovalo řízení

kompenzačního kapacitního jalového výkonu pro energetickou síť. V současnosti se však používají již jen statické kompenzátory.

Vlastnosti řízení jalového výkonu synchronního stroje změnou budicího proudu I_f vystihuje graf na obr. 23. Jedná se o tzv. **V-křivky synchronního stroje**. Jedná se o závislosti efektivní hodnoty satorového proudu na proudu rotorového budicího vinutí I_f . Parametrem těchto křivek je činný výkon stroje P , resp. moment stroje. **V-křivky znázorňují změnu efektivní hodnoty proudu vinutí satoru při změnách budicího proudu a činného výkonu.** V-křivky mají minimum pro nulový činný výkon stroje, tedy pro případ, kdy je $\cos \varphi = 1$. Pro nižší hodnoty budicího proudu od tohoto minima narůstá efektivní hodnota proudu satoru vlivem růstu induktivní jalové složky tohoto proudu, pro hodnoty budicího proudu vyšší než odpovídá minimu V-křivek narůstá efektivní hodnota proudu satoru vlivem rostoucí kapacitní jalové složky proudu satorového vinutí. Pro nulový činný výkon je minimální efektivní hodnota proudu vinutí satoru na odpovídající V-křivce nulová.

V-křivky jsou omezeny zleva **mezi synchronismu**. To je dáno skutečností, kdy se při snižování budicího proudu I_f snižuje maximální dosažitelný moment stroje a při dosažení stavu, kdy se tento moment vlivem snížení budicího proudu sníží natolik, že je nižší než odpovídá aktuální V-křivce, dojde u stroje k vypadnutí ze synchronismu.



Obr. 23 V-křivky synchronního stroje

7 Rozběh synchronního stroje a jeho fázování k elektrické síti

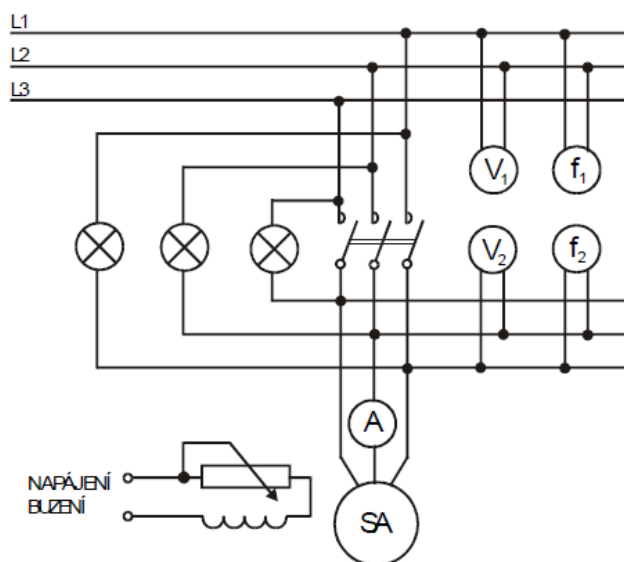
Připojí-li se synchronní stroj k napájecímu zdroji s konstantní frekvencí, nerozeběhne se, protože synchronní i reluktanční složka momentu působí jen v synchronismu rotoru s točivým magnetickým polem. U regulovaných pohonů se synchronními motory se rozběh zajišťuje pomocí frekvenčního řízení se zpětnou vazbou, tj. frekvence napájecího napětí se zvyšuje postupně a stroj se udržuje v synchronismu od nulových otáček.

U synchronních motorů, které pracují s napájením ze sítě s pevnou efektivní hodnotou napětí a s pevnou frekvencí (zpravidla se jedná o pohony velkých výkonů), se někdy využívá **asynchronní rozběh**. Pro tento způsob rozběhu musí být stroj konstrukčně uzpůsoben, nejčastěji v pólech budicího vinutí na rotoru jsou umístěny tyče spojené nakrátko. Tyto tyče plní funkci rozběhového vinutí, principiálně obdobného jako je rotor nakrátko u asynchronního motoru. V takto konstruovaném synchronním stroji vzniká asynchronní moment v důsledku indukování proudů do uvedeného rotorového obvodu nakrátko. Asynchronní moment tedy u tohoto stroje umožní rozběh z nulových otáček a po přiblížení rychlosti rotoru rychlosti synchronní je možno stroj nabudit a ten se následně vtáhne do synchronismu a začne působit synchronní, popř. i reluktanční moment.

Častým případem rozběhů velkých synchronních strojů, ve velké míře alternátorů v elektrárnách, je **rozběh pomocí cizího stroje**, pomocného motoru nebo turbíny v elektrárně. Pomocným strojem se synchronní stroj opět rozběhne do blízkosti synchronní rychlosti a po nabuzení a připojení statorového vinutí k elektrické síti se opět vtáhne do synchronismu. Pro připojení roztočeného a nabuzeného synchronního stroje k elektrické síti je však třeba dodržet tzv. **fázovací podmínky**. Elektrická síť a nabuzený synchronní stroj mají charakter zdrojů napětí a jejich propojení je možné jen při minimálních rozdílech napětí sítě a stroje, které je v podstatě jeho indukovaným napětím. Při nesplnění fázovacích podmínek by se mezi sítí a strojem uzavíraly velké vyrovnávací proudy a došlo by k vybavení nadproudových ochran. Fázovací podmínky jsou následující:

- Stejná efektivní hodnota napětí elektrické sítě a synchronního stroje
- Stejná frekvence napětí elektrické sítě a synchronního stroje
- Stejný fázový posun napětí elektrické sítě a synchronního stroje
- Stejný sled fází elektrické sítě a synchronního stroje

Princip připojování synchronního stroje k síti, tzv. fázování, při dostatečné míře splnění fázovacích podmínek, je zřejmý z obr. 24. Paralelně ke kontaktům spínacího přístroje pro připojení synchronního stroje, nejčastěji alternátoru, k síti jsou připojeny prvky indikující rozdíly napětí jednotlivých fází elektrické sítě a synchronního stroje. Na obr. 24 jsou pro tento účel použity žárovky indikující rozdíly napětí ve světelné formě. Při rozběhu synchronního stroje do blízkosti synchronismu se žárovky budou rozsvěcovat a pohasínat v rytmu rozdílové frekvence mezi frekvencí elektrické sítě a synchronního stroje. Při dosažení hodnoty této rozdílové frekvence v řádech desetin Hz je možno synchronní stroj připojit k elektrické síti, avšak v okamžiku, kdy jsou žárovky zhasnuté, tj. v okamžiku nulového rozdílu napětí elektrické sítě a synchronního alternátoru. Jedná se o tzv. fázování na tmě. Stejnou funkci jako žárovky mohou splnit např. voltmetry. U moderních fázovacích zařízení se využívá automatického fázování pomocí elektronického řízení, princip však zůstává i u automatického fázování stejný.



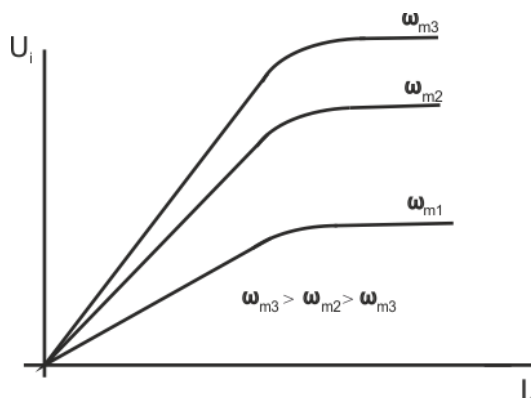
Obr. 24 K vysvětlení postupu fázování synchronního stroje k elektrické síti

8 Specifické vlastnosti a zatěžování synchronních alternátorů

Synchronní alternátory využívají jako zdroj napětí indukované napětí ve statorovém vinutí, pro jehož efektivní hodnotu platí vztah (3). V případě alternátoru s budicím vinutím lze tedy pro řízení indukovaného napětí využívat změnu budicího proudu I_f . Ze vztahu (3) je zřejmá lineární závislost mezi efektivní hodnotou indukovaného napětí U_i a velikostí spřaženého magnetického toku Ψ_f . Závislost mezi proudem rotorového budicího vinutí I_f a spřaženým magnetickým tokem Ψ_f je však lineární pouze v nenasyčené oblasti magnetického obvodu. Po dosažení nasycení magnetického obvodu již dále s rostoucím budicím proudem I_f budicí spřažený magnetický tok Ψ_f ani efektivní hodnota indukovaného napětí U_i nerostou. Z této vlastnosti vychází průběhy závislosti $U_i = f(I_f)$ synchronního stroje naprázdno. Na těchto závislostech je zřejmá oblast přesycení – obr. 25.

Specifické vlastnosti mají synchronní alternátory při elektrickém zatěžování.

Vlastnosti alternátoru při zatížení závisí ve velké míře na charakteru zatěžovacího obvodu, tj. na převažující zátěžné impedanci R nebo L nebo C . Následující úvahy budou provedeny pro náhradní schéma statorového vinutí synchronního stroje ve struktuře podle obr. 13, avšak se zanedbaným odporem statorového vinutí. Statorový obvod je tedy uvažován jako sériová kombinace zdroje indukovaného napětí U_i a vnitřní indukčnosti statorového vinutí L resp. vnitřní reaktance X_d . Pro jednoduchost je uvažován alternátor s magnetickou symetrií rotoru.

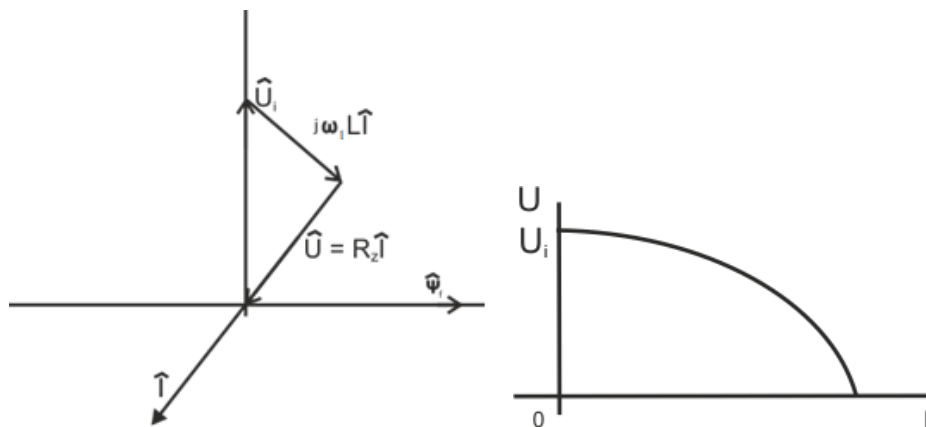


Obr. 25 Závislosti efektivní hodnoty indukovaného napětí synchronního stroje na budicím proudu pro různé hodnoty mechanické úhlové rychlosti

Na obr. 26 vlevo je znázorněn fázorový diagram synchronního alternátoru, který je zatížen do čistě odporové zátěže R_z . Fázor indukovaného napětí U_i se rozloží na úbytek napětí na vnitřní indukčnosti L alternátoru a na napětí U , tj. napětí na zátěžném odporu R_z . Proud I je v obvodu společný a z toho důvodu svírají fázory napětí na vnitřní indukčnosti L alternátoru a napětí na zátěžném odporu R_z pravý úhel, všechny tři fázory napětí v obvodu tedy tvoří pravoúhlý trojúhelník. Pro tento trojúhelník lze psát Pythagorovu větu s vyjádřením délek stran ve vazbě na elektrickou reprezentaci velikostí (efektivních hodnot) veličin:

$$U_i^2 = (R \cdot I)^2 + (\omega \cdot L \cdot I)^2 = U^2 + (\omega \cdot L \cdot I)^2 \quad (19)$$

Rovnice (19) vyjadřuje závislost efektivní hodnoty napětí alternátoru U na efektivní hodnotě proudu I , je tedy analytickým vyjádřením zatěžovací charakteristiky alternátoru s čistě odporovou zátěží. Vztah (19) je pro konstantní hodnotu indukovaného napětí U_i **rovnicí elipsy**, zatěžovací charakteristika synchronního alternátoru s čistě odporovou zátěží má tedy tvar elipsy podle obr. 26 vpravo.

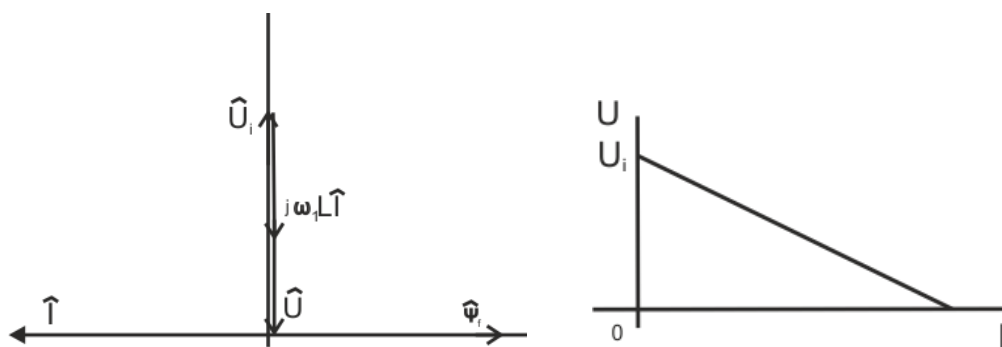


Obr. 26 Fázorový diagram a zatěžovací charakteristika synchronního alternátoru s čistě odporovou zátěží

Na obr. 27 vlevo je znázorněn fázorový diagram synchronního alternátoru, který je zatížen do čistě induktivní zátěže. Fázor indukovaného napětí U_i se rozloží na úbytek napětí na vnitřní indukčnosti L alternátoru a na napětí U , tj. napětí na zátěži. Proud I je v obvodu společný a z toho důvodu jsou fázory indukovaného napětí U_i , úbytek napětí na vnitřní indukčnosti stroje L a fázor svorkového napětí U rovnoběžné. Pro vzájemnou relaci mezi velikostmi uvedených fázorů lze psát vztah:

$$U = U_i - \omega \cdot L \cdot I \quad (20)$$

Rovnice (20) vyjadřuje závislost efektivní hodnoty napětí alternátoru U na efektivní hodnotě proudu I , je tedy analytickým vyjádřením zatěžovací charakteristiky alternátoru s čistě induktivní zátěží. Vztah (20) je pro konstantní hodnotu indukovaného napětí U_i **rovnicí klesající přímky**, zatěžovací charakteristika synchronního alternátoru s čistě induktivní zátěží má tedy lineární průběh podle obr. 27 vpravo.



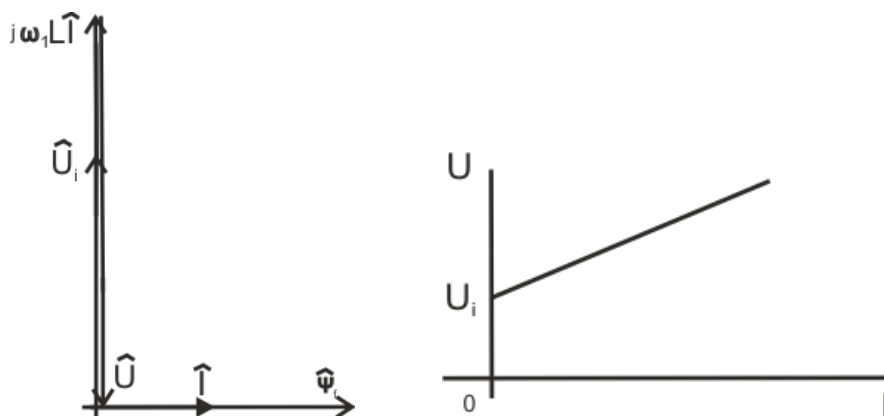
Obr. 27 Fázorový diagram a zatěžovací charakteristika synchronního alternátoru s čistě induktivní zátěží

Na obr. 28 vlevo je znázorněn fázorový diagram synchronního alternátoru, který je zatížen do čistě kapacitní zátěže. Fázor indukovaného napětí U_i se rozloží na úbytek napětí na vnitřní indukčnosti L alternátoru a na napětí U , tj. napětí na zátěži. Proud I je v obvodu společný a z toho důvodu jsou fázory indukovaného napětí U_i , úbytek napětí na vnitřní indukčnosti stroje L a fázor svorkového napětí U rovnoběžné. Pro vzájemnou relaci mezi velikostmi uvedených fázorů lze psát vztah:

$$U = U_i + \omega \cdot L \cdot I \quad (21)$$

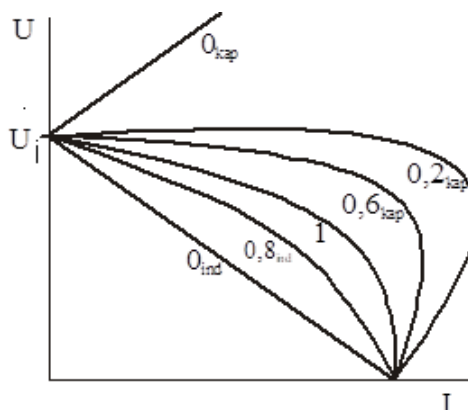
Rovnice (21) vyjadřuje závislost efektivní hodnoty napětí alternátoru U na efektivní hodnotě proudu I , je tedy analytickým vyjádřením zatěžovací charakteristiky alternátoru s čistě kapacitní zátěží. Vztah (21) je pro konstantní hodnotu indukovaného napětí U_i **rovnicí rostoucí přímky**, zatěžovací charakteristika synchronního alternátoru s čistě kapacitní zátěží

má tedy lineární průběh podle obr. 28 vpravo. Tím, že zatěžovací charakteristika je v tomto případě rostoucí, představuje zatížení synchronního alternátoru kapacitou nebezpečný stav, kdy může **svorkové napětí nepřiměřeně vzrůstat**. Tento nebezpečný stav může nastat například v případě připojení nezatíženého vedení na synchronní alternátor, kdy se dominantním způsobem uplatní parazitní kapacity vedení.



Obr. 28 Fázorový diagram a zatěžovací charakteristika synchronního alternátoru s čistě kapacitní zátěží

V reálných případech lze předpokládat zatížení synchronního alternátoru impedancí s charakterem RL nebo RC. Příklady průběhů zatěžovacích charakteristik alternátoru pro několik hodnot účinníku v induktivní a kapacitní oblasti jsou uvedeny na obr. 29.



29 Zatěžovací charakteristiky alternátoru pro různé typy zátěží

Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.



Pohonné a napájecí systémy pro elektromobilitu

Vlastnosti Li akumulátorových článků
a trakčních Li baterií

Studijní materiál

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.



Vlastnosti Li akumulátorových článků a trakčních Li baterií

Trakční akumulátorová baterie se skládá z elementárních **akumulátorových článků**. Tyto články se prakticky vždy řadí **do série**, v některých případech i paralelně. Vlastnosti elementárních akumulátorových článků určují zásadním způsobem vlastnosti celé akumulátorové baterie. V současnosti se v trakčních akumulátorech používají **téměř výhradně články na bázi Lithia (Li)**. Po stránce chemické existuje více typů lithiových akumulátorů, které se liší řadou vlastností a parametrů. Vlastnosti několika technologií lithiových článků, které se používají v trakčních bateriích, budou uvedeny v dalším textu.

Akumulátorový elementární článek má vlastnosti **reálného stejnosměrného zdroje napětí**, tj. vykazuje malý vnitřní odpor a s rostoucím odebíraným proudem klesá jeho svorkové napětí. Elektrochemický elementární článek má dvě elektrody, **anodu a katodu**. U Li článků je **anoda řešena na bázi grafitu a katoda na bázi sloučenin lithia**. **Kladný napěťový pól článku je na katodě, záporný na anodě**. V prostoru mezi anodou a katodou je **elektrolyt** na bázi lithných solí rozpuštěných v organickém rozpouštědle. V elektrolytu je mezi katodou a anodou umístěna **selektivní vrstva separátoru**, který umožňuje průchod **lithiových iontů**. Separátory jsou tvořeny látkami na bázi polyetylenu nebo polypropylenu. Při nabíjení článku se přesouvají kladné lithné ionty z katody na anodu v prostředí elektrolytu. Tyto ionty se váží na anodu, pro dosažení co nejvyšší kapacity je vytvořena anoda z pórovitého materiálu s co největším povrchem. Při nabíjení se uzavírá vnějším obvodem tok elektronů směrem k anodě. Při vybíjení dochází k procesu opačnému, proud elektronů vychází z anody teče a do zátěže. V elektrolytu procházejí kladné ionty od anody ke katodě.

1 Parametry, technologie a provedení akumulátorových článků

Vlastnosti elementárních elektrochemických akumulátorových článků jsou kvantifikovány skupinou typických parametrů. Nejvýznamnější parametry elektrochemických článků jsou následující:

- **Kapacita článku** – jednotkou je Ah (ampérhodiny) a udává kolik A je možno z článku odebírat po dobu jedné hodiny. Kapacita v Ah není ve všech případech konstantní, ale závisí na teplotě článku a velikosti protékajícího proudu. S rostoucím proudem a klesající teplotou kapacita článku klesá.
- **Energetická kapacita** - jednotkou je Wh a udává kolik W je možno z článku odebírat po dobu jedné hodiny. Kromě teploty a proudu závisí velikost energetické kapacity také na napětí článku, které je při provozu článků proměnné.
- **Napětí článku** – udává se jmenovitá hodnota napětí ve V. U většiny technologií Li článků se jmenovitá hodnota napětí pohybuje mezi 3 a 4 V. Okamžitá hodnota svorkového napětí článku se mění především v závislosti na velikosti a směru proudu a v závislosti na stavu nabití. Okamžitá hodnota napětí článku se může měnit až v rozmezí $\pm 20\%$ od hodnoty jmenovitého napětí.
- **Vybíjecí a nabíjecí proud** – udává se v násobcích C. Hodnota proudu 1C je taková, je-li proud v A roven číselné hodnotě kapacity článku v Ah. Maximální trvalé hodnoty vybíjecích proudů dosahují u Li článků hodnot 1C až 8C v závislosti na konkrétní technologii, maximální trvalé hodnoty nabíjecích proudů jsou vždy nižší a dosahují hodnot 0,5C až 5C.
- **Vybíjecí a nabíjecí výkon** – jedná se o analogickou veličinu jako nabíjecí proud, udává se rovněž v násobcích C a vychází z relace mezi energetickou kapacitou článku ve Wh a výkonem při nabíjení nebo vybíjení.
- **Vnitřní odpor článku** – je dána technologií a konstrukcí článku a pohybuje se v řádech desetin m Ω . Jeho velikost není stálá, mění se především v závislosti na

teplotě (s rostoucí teplotou klesá) a na stavu nabití. Mění se i v závislosti na režimu nabíjení/vybíjení, při nabíjení je vyšší.

- **Životnost článku** – udává se v počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů za přesně definovaných podmínek (teplota, proud, hloubka vybíjení). U Li článků se životnost pohybuje v závislosti na konkrétní technologii v jednotkách až nižších desítkách tisíc cyklů. Po dosažení definovaného počtu cyklů není článek nutně nepoužitelný, ale je počítáno s tím, že jeho kapacita klesla na 80% původní hodnoty. Životnost silně závisí na provozních teplotách, na velikosti vybíjecích na nabíjecích výkonů (s rostoucími výkony životnost klesá) a na hloubce vybíjení (při hlubokém vybíjení životnost klesá).
- **Teplota článku** – optimální provozní teploty Li článků jsou v rozmezí 20 až 30°C. Maximální provozní teplota je 60°C. Minimální provozní teploty jsou u většiny technologií Li článků při nabíjení omezeny hodnotou 0°C, vybíjet lze Li články i při záporných teplotách až do -20°C, avšak při výrazně sníženém výkonu.
- **Objemová hustota energie** – udává kolik energie je možno v článku uložit v jednotce objemu. Udává se ve Wh/l. U Li článků se zpravidla pohybuje v rozsahu 100 až 300 Wh/l.
- **Hmotnostní hustota energie** – udává kolik energie je možno v článku uložit v jednotce hmotnosti. Udává se ve Wh/kg. U Li článků se zpravidla pohybuje v rozsahu 100 až 250 Wh/kg. Pro srovnání lze uvést, že hmotnostní hustota energie je u olověných článků 30 až 40 Wh/kg.
- **Stav nabití (State of Charge, SOC)** – udává okamžitý stav nabití článku. SOC = 100% odpovídá plně nabitému článku.
- **Hloubka vybití (Depth of Discharge, DOD)** – udává okamžitý stav vybití článku. DOD = 100% odpovídá zcela vybitému článku, DOD = 100 – SOC.

Li články zahrnují řadu typů technologií, ne všechny technologie Li článků se využívají ve trakčních akumulátorových bateriích. V následující Tab. 1 je uveden orientační přehled hlavních typů a parametrů technologií Li článků, které se používají pro mobilní aplikace.

Parametr	Jednotka	LFP (lithium železo fosfát)	NCA (lithium nikl kobalt hliník oxid)	LTO (lithium titan oxid)	NMC HP (lithium nikl mangan kobalt), high power	NMC HE (lithium nikl mangan kobalt), high energy
Jmenovité napětí	V	3,3	3,6	2,3	3,7	3,7
Hmotnostní hustota energie jen článků	kWh/t	100	200 - 250	70 - 90	150	170 - 180
Objemová hustota energie jen článků	kWh/m ³	120 - 170	400 - 600	170	340	400
Trvalý vybíjecí proud	C	2 - 3	2	6 - 8	5	2 – 3

Počet cyklů						
	-	3 000 - 5000	1000	10 000 – 20 000	3000 - 5000	3000 - 5000

Tab. 1 Srovnání parametrů hlavních technologií Li článků pro elektromobilitu

Z Tab. 1 jsou zřejmé odlišné parametry jednotlivých technologií.

Články LFP jsou díky svým dobrým vlastnostem používány nejen v mobilních aplikacích, ale například v akumulacích systémech fotovoltaických elektráren. V mobilních aplikacích se uplatňují především u větších silničních vozidel, například u elektrobuseů. Jsou cenově příznivé, bezpečné a mají dostatečnou životnost. Mají nižší hmotnostní hustotu energie, avšak vykazují relativně malý vnitřní odpor. V některých případech nahrazují olověné akumulátory, například v případě realizace pomocných palubních akumulátorů 12V nebo 24 V.

Články NCA se vyznačují vysokou hmotnostní hustotou energie, mají však nižší životnost a jsou schopny pracovat s nižšími výkony. Cenově jsou tyto články méně příznivé. Tyto technologie článků se využívají v některých typech elektrických osobních automobilech.

Články LTO jsou specifickou technologií, oproti ostatním Li článkům mají odlišnost v materiálu anody, která zde není na bázi grafitu, ale na bázi titaničitanu lithného (Li_2TiO_3). Jedná se o vysoce porézní materiál dosahující až 33 násobné plochy na jednotku hmotnosti ve srovnání s grafitem. Mají nižší hmotnostní hustotu energie a ve srovnání s ostatními technologiemi Li článků nízké napětí, vynikají však možností velkého výkonového zatížení a vynikající životností. Mají vysokou cenu, avšak vysoká životnost do velké míry nevýhody vysoké ceny eliminuje. Články LTO se používají v akumulátorových bateriích pro vozidla hromadné dopravy, především v parciálních trolejbusích a v železničních vozidlech.

Články NMC HP (High Power) se uplatňují v obdobných aplikacích jako články LTO, mají však vyšší hmotnostní hustotu energie a nižší životnost.

Články NMC HE (High Energy) mají chemické složení katody stejné jako články NMC HP, liší se však technologicky. Je zde především zvýšena hmotnostní hustota energie. Tyto články se používají napříč spektrem dopravních prostředků od elektrokol až po větší silniční, někdy i železniční vozidla. V současnosti se NMC články stávají dominantní technologií v elektrických osobních automobilech. Používají se i mimo oblast mobility například v ručním nářadí, v lékařské technice nebo v systémech zálohového napájení.



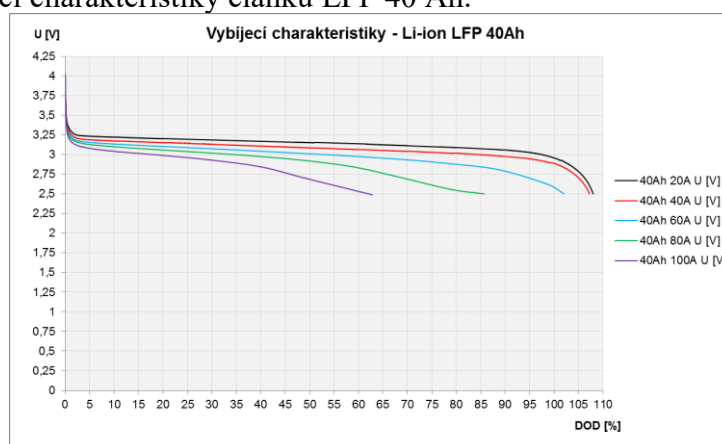
Obr. 1 Různá provedení Li akumulátorových článků

Akumulátorové články se vyrábějí v různých provedeních, jak je zobrazeno na obr. 5. Na obr. 1 a) je provedení článku LFP 40 Ah **v plastovém pouzdře**. V těchto typech pouzder o různé velikosti se dodávají články LFP s kapacitami v řádech desítek až nižších stovek Ah. Na obr. 1 b) je článek LTO **v kovovém pouzdře**. Na obr. 1 c) je článek NMC **ve válečkovém pouzdře**. V těchto pouzdrech se dodávají NMC články s kapacitami typicky 2 Ah a 3,5 Ah. Přestože se jedná o malou kapacitu, používají se v některých případech tyto články i pro větší

elektrická vozidla. V jednom vozidle se pak nachází několik tisíc těchto článků, v případě elektrobuse až několik desítek tisíc kusů. Na obr. 1 d) je NMC článek 105 Ah **ve fóliovém pouzdře**. V těchto typech pouzder se dodávají NMC články s kapacitami od desítek do stovek Ah.

2 Napětí akumulátorových článků

Jak bylo uvedeno výše, napětí akumulátorových článků se při provozu mění v poměrně širokých mezích, především v závislosti na okamžitém stavu nabití a na aktuální velikosti proudu. Například u článků NMC se jmenovitým napětím 3,7 V se napětí může při provozu pohybovat až v rozmezí 2,8 až 4,2 V. Napěťové vlastnosti článku se často uvádějí ve formě **vybíjecí charakteristiky**. Jedná se o **závislost napětí článku na stavu vybití DOD**, v jednom grafu je možno zobrazit více těchto charakteristik pro různé proudy. Na obr. 2 je uveden příklad vybíjecí charakteristiky článku LFP 40 Ah.



Obr. 2 Příklad vybíjecí charakteristik pro článek LFP 40 Ah

Obr. 2 vyjadřuje typické vlastnosti Li článků, tj. skutečnost že při zahájení vybíjení do hodnoty DOD 5 až 10% napětí článku prudce klesá, poté je až do hodnoty DOD 75 až 95% relativně stálé, jen s mírným poklesem, a následně v oblasti hlubokého vybití článku opět napětí strmě klesá. V grafu působí na první pohled nelogicky vybíjení přes hodnotu DOD 100%. Tato vlastnost je však reálná v tom kontextu, že hodnota DOD 100% platí pro definované podmínky vybíjení (teplota, proud). Při vybíjení nižším proudem, než odpovídá charakteristice, při které je článek při DOD = 100% právě zcela vybitý, se uplatňují menší ztráty na vnitřním odporu článku ($\Delta P \sim I^2$), méně energie se tudíž zmaří na ztráty na vnitřním odporu a více energie je možno odebrat na svorkách článku. Z obr. 2 je rovněž zřejmé, že s rostoucím proudem se pracovní bod článku pohybuje po vybíjecí charakteristice s nižším napětím, svorkové napětí článku je oproti vnitřnímu napětí sníženo o úbytek napětí na vnitřním odporu článku, který je přímo úměrný protékajícímu proudu. V závislosti na technologii článku se mohou průběhy vybíjecích charakteristik částečně lišit, například u článků NMC je ve vybíjecích charakteristikách relativně malý pokles napětí v oblasti malých hodnot DOD, naopak výraznější je pokles napětí pro hodnoty DOD blízké 100%. Vždy je však ve vybíjecích charakteristikách Li článků patrný typický průběh s výraznými poklesy napětí v oblasti malého vybití a malého nabití.

Zatímco při vybíjení se s rostoucím proudem svorkové napětí článku snižuje, při nabíjení se svorkové napětí s rostoucím proudem zvyšuje. Tato vlastnost vychází ze struktur obvodových modelů článků, které jsou popsány níže.

Napětí lithiových článků je významnou veličinou pro diagnostiku článku. **Li články není vhodné zcela vybit nebo naopak přebíjet**. Tyto procesy by mohly vést až ke zničení

článku. Pro dosažení dobré životnosti článku je vhodné jej provozovat v rozmezí DOD 10% až 80%, tj. v rozmezí SOC 90% až 20%. Další zúžení rozsahu DOD a SOC, který je při používání článku využíván, má další pozitivní dopady na zvýšení životnosti.

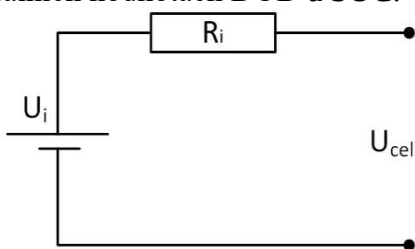
3 Obvodové modely akumulátorových článků

Modely akumulátorových článků mohou být koncipovány různými způsoby:

- Modely vycházející z chemické struktury
- Obvodové elektrické modely
- Další typy modelů využívající principů obecného modelování dynamických soustav

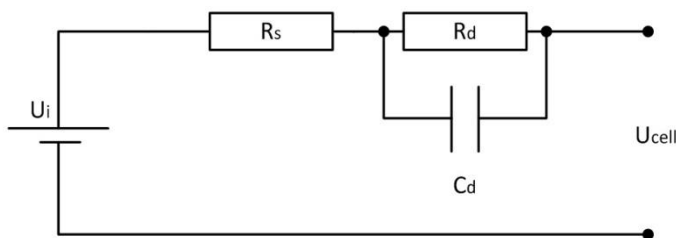
Pro analýzy trakčních soustav vozidel jsou vhodné elektrické obvodové modely, kterým bude nadále věnována pozornost. Nevykazují takovou složitost jako modely vycházející z chemické struktury a v hlavních rysech popisují elektrické vlastnosti potřebné pro součinnost s modely trakčních řetězců elektrických vozidel.

Nejjednodušším obvodovým modelem Li článku je tzv. **R_i model**. Tento model je totožný s obvodovým modelem reálného zdroje stejnosměrného napětí a je tvořen **sériovou kombinací zdroje vnitřního napětí U_i a vnitřního odporu R_i** – obr. 3 R_i model popisuje vhodně statické vlastnosti akumulátorového článku a pro přesnější modelování je vhodné adaptovat hodnotu odporu R_i podle aktuální hodnoty DOD, resp. SOC a podle teploty. Nepostihuje však dynamické vlastnosti článku. Velikost vnitřního odporu R_i závisí i na režimu nabíjení/vybíjení, v režimu nabíjení se vnitřní odpor R_i mírně zvyšuje. Dále závisí velikost odporu R_i na teplotě, s rostoucí teplotou se tento odpor snižuje. Velikost vnitřního napětí U_i závisí především na aktuálních hodnotách DOD a SOC.



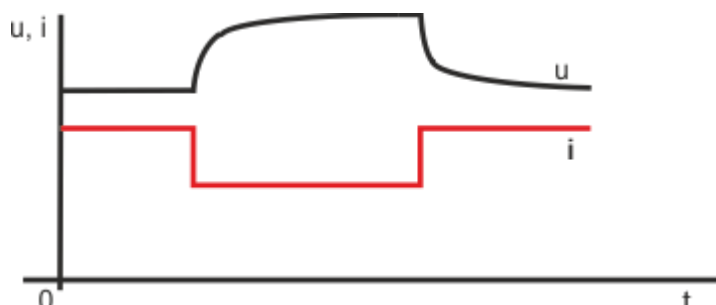
Obr. 3 Struktura R_i modelu akumulátorového článku

R_i model nepostihuje typickou vlastnost Li článků při změnách hodnot nabíjecího nebo vybíjecího proudu. Jedná se o zpoždění nárůstu svorkového napětí článku po proudovém odlehčení vybíjeného článku a zpoždění poklesu svorkového napětí po proudovém zatížení. Nejjednodušším modelem, který modeluje tuto vlastnost, je **model prvního řádu**, který modeluje exponenciální odezvy svorkových napětí článku po skokových změnách proudu. Doby ustalování svorkových napětí po změnách proudu se u Li článků pohybují v řádech minut. Obvodový model prvního řádu je na obr. 4.

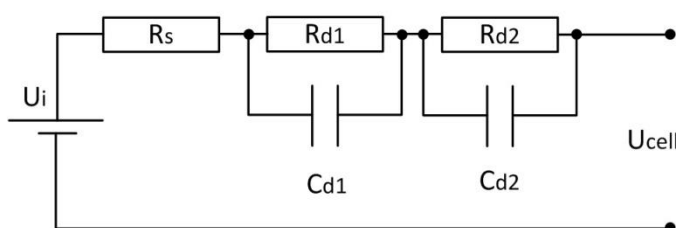


Obr. 4 Obvodový model Li článku 1. řádu

Reálná odezva napětí akumulátorového článku na změnu velikosti proudu je znázorněna na obr. 5. Průběh napětí se po změně proudu skládá ze dvou částí. První část napěťové odezvy je rychlá a trvá řádově desítky až stovky ms. Během této doby se napětí přiblíží k ustálené hodnotě. Druhá část odezvy svorkového napětí akumulátorového článku se uskutečňuje v čase v řádech minut v blízkosti ustálené hodnoty napětí. Tento charakter odezvy napětí se modeluje pomocí náhradního obvodového **modelu článku 2. řádu** podle obr. 6.



Obr. 5 Napěťové odezvy akumulátorového článku při změnách proudu



Obr. 6 Obvodový model Li článku 2. řádu

Kromě modelů Li článků na obr. 3, 4 a 6 existují jejich další obvodové modely se složitějšími strukturami. S rostoucí mírou složitosti obvodového modelu narůstají komplikace při parametrizaci těchto modelů. Použití složitějšího modelu nemusí vždy vést k adekvátnímu zpřesnění výsledků a to vzhledem k velké závislosti parametrů článku na řadě veličin, například na SOC, teplotě, stáří článku. Vzhledem ke složitosti reálné chemické struktury článku nejsou zcela totožné parametry a vlastnosti ani u článků téhož typu z jedné výrobní série. Pro přibližné určení statických vlastností článku se proto používá zpravidla obvodový model podle obr. 3, pro modelování článků včetně jejich dynamických vlastností se používají nejobvyklejší modely podle obr. 4 a 6.

4. Konstrukce trakční akumulátorové baterie

Jak bylo uvedeno výše, akumulátorová baterie se skládá z většího počtu článků. Počet sériově řazených článků vychází z napětí jednoho článku a požadovaného napětí celé baterie. Paralelní řazení článků se nepoužívá ve všech případech, ale jen v případě potřeby posílení kapacity baterie v Ah, jsou-li použity články s menší kapacitou v Ah než je požadovaná kapacita celé baterie.

Akumulátorová Li baterie se skládá z většího počtu subsystémů:

- Akumulátorové články a komponenty pro jejich upevnění a elektrické propojení
- Skříň akumulátorové baterie s potřebným stupněm krytí a potřebnou mechanickou a elektrickou pevností
- Elektronický systém pro monitoring a ochranu při provozu baterie, tzv. **batterymangement (BMS)**

- Jisticí, případně i spínací přístroje
- Systémy pro zabezpečení potřebných teplotních podmínek baterie (kapalinové nebo vzduchové chlazení, v některých případech klimatizace nebo systém pro temperování)

Doplnění elementárních článků o další technologie v baterii přispívá ke zvýšení hmotnosti a objemu baterie. Podíl hmotnosti a objemu článků a podpůrných technologií je ve velké míře závislý na konkrétní technologii Li článků. V Tab. 2 jsou orientačně uvedeny poměrné hmotnosti podpůrných technologií Li baterie vůči hmotnosti článků.

Technologie Li	LFP	NCA	LTO	NMC HP	NMC HE
Hmotnost podpůrných technologií baterie	0,2 mčlánků	0,4 – 0,5 mčlánků	0,15 mčlánků	0,3 mčlánků	0,3 – 0,4 mčlánků

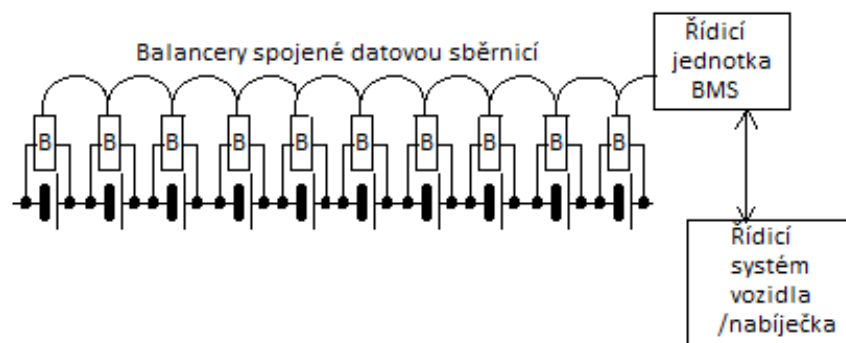
Tab. 2 Poměrné hmotnosti podpůrných technologií Li baterií vůči hmotnosti článků

Zásadní význam má v Li baterii batterymanagement. Batterymanagement hlídá podmínky provozu každého bateriového článku, v některých případech hlídá podmínky provozu skupiny paralelně řazených článků. Jeho hlavní funkce jsou:

- Hlídání napětí článku a ochrana proti přebití (při přebití a nepřiměřeném zvýšení napětí článku hrozí zničení článku, případně i jeho exploze)
- Hlídání napětí článku a ochrana proti hlubokému vybití (při hlubokém vybití a nepřiměřeném snížení napětí článku hrozí zničení článku)
- Sledování aktuálních hodnot proudu, napětí a SOC baterie
- Monitoring teploty článků (mnohdy se měří teplota nikoli jednotlivých článků, ale teplota ve vybraných kritických místech baterie)
- Komunikace s nadřazeným řídicím systémem vozidla a iniciace akčních zásahů související se zachováním bezpečného provozu baterie (iniciování spínacích přístrojů pro připojení baterie do silového obvodu vozidla, iniciování proudového omezení při nabíjení nebo vybíjení v návaznosti na aktuální podmínky baterie – teplota, napětí, SOC, aktivace chladicích nebo topných systémů baterie)
- Vyrovnávání napěťových a kapacitních poměrů jednotlivých článků, tzv. balancování (jedná se o proces, kdy se eliminuje vliv ne vždy zcela stejných parametrů jednotlivých článků tak, že se srovnávají napětí jednotlivých článků baterie na stejnou hodnotu buď vybíjením nejvíce nabitých článků nebo předáváním elektrického náboje z nejvíce nabitých do nejvíce vybitých článků)

Batterymanagement je tvořen elektronickými obvody, které indikují napětí všech článků baterie, protékající proud, teploty v určených místech baterie měřené obvykle termočlánky. Batterymanagementje může být po stránce konstrukce HW tvořen jednotlivými tzv. balancery, tedy elektronickými obvody připojenými ke každému článku baterie, spojenými datovou sběrnici a centrální jednotkou batterymanagementu, která komunikuje s řídicím systémem vozidla nebo může být konstrukce BMS soustředěna do jednoho elektronického obvodu na který jsou připojeny výstupy měřicích členů baterie (snímání napětí všech článků, snímání proudu, snímání teploty).

Na obr. 7 a) je principiální zapojení batterymanagementu s balancery instalovanými u každého článku a s centrální řídicí jednotkou batterymanagementu, na obr. 7 b) vlevo je znázorněn příklad konkrétního řešení tohoto systému s akumulátorovými články LFP, na obr. 11 b) vpravo je znázorněn balancer bateriového modulu s články LTO v parciálním trolejbusu. Na obr. 8 jsou možná řešení bateriové výzbroje vozidla – bateriový kontejner na střeše tramvaje s pomocným akumulátorovým napájením, bateriový box pod sedadly v elektrobusu a pohledy na bateriový kontejner na střeše parciálního trolejbusu.



Obr. 7 Zapojení batterymanagementu s balancery a centrální řídicí jednotkou batterymanagementu (a)) a příklad realizace balancerů u akumulátorových článků LFP (b) vlevo) a LTO (b) vpravo)



Obr. 8 Příklady provedení bateriové výzbroje vozidla – bateriový kontejner na střeše tramvaje, bateriový box v elektrobusu a měničový (v popředí) a bateriový (vzdálenější) kontejner a odkrytý bateriový kontejner na střeše parciálního trolejbusu,

Specifickou funkcí batterymanagementu je **balancování**. Jedná se o vyrovnávání nábojů v jednotlivých článcích akumulátorové baterie, neboť vzhledem k ne zcela stejným parametrům jednotlivých článků dochází při jejich provozu k rozvážení jejich náboje a napětí. Rozvážení nábojů a napětí jednotlivých článků v baterii má zásadní dopad na provoz baterie, neboť **celková kapacita baterie je limitována nejvíce vybitým článkem**. **Balancování**, tedy vyrovnávání nábojů a napětí jednotlivých článků, **je tedy nutné především z důvodu zachování životnosti článků a z důvodu obnovy kapacity akumulátorové baterie**. Balancování lze provádět:

- **Periodicky** – balancování baterie se provádí s periodou řádově dnů zpravidla při pomalém (například nočním) nabíjení na konci nabíjecího procesu, kdy se baterie nabíjí na plnou kapacitu sníženým proudem a energie nejvíce nabitých článků se v tomto procesu zpravidla maří na teplo. Periodické balancování lze provádět i při klidovém stavu baterie, opět se zde energie nejvíce nabitých článků maří na teplo tak, aby se náboj všech článků vyrovnal.
- **Průběžně** – elektronická jednotka balanceru průběžně řídí vybíjení nejvíce nabitých článků.

Z hlediska technické realizace balancování lze rozlišit dva způsoby:

- **Pasivní balancování** – energie nejvíce nabitých článků se maří na teplo tak dlouho, dokud se náboje a napětí těchto článků nevyrovnají s náboji a napětími nejméně nabitých článků. Energie nejvíce nabitých článků se maří na teplo zpravidla v tranzistorech paralelně připojených k článkům, tranzistory zde pracují v zesilovacím režimu. Řízení těchto tranzistorů zajišťuje řídicí jednotka batterymanagementu podle aktuálních hodnot napětí balancovaných článků.
- **Aktivní balancování** – energie se odebírá z nejvíce nabitých článků, přechodně se uchová v zásobnících, typicky kondenzátorech, a následně je využita k doplnění náboje do nejméně nabitých článků. Aktivní balancování je výhodné jak z hlediska efektivního hospodaření s energií, tak i z hlediska nižšího tepelného zatížení systému.

U moderních systémů batterymanagementu je preferováno průběžné aktivní balancování.

Vytvořeno v rámci projektu **Green Deal UPCE**, reg. č. NPO_UPCE_MSMT-2142/2024-4.

Toto dílo podléhá licenci Creative Commons BY-SA 4.0. Pro zobrazení licenčních podmínek navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

