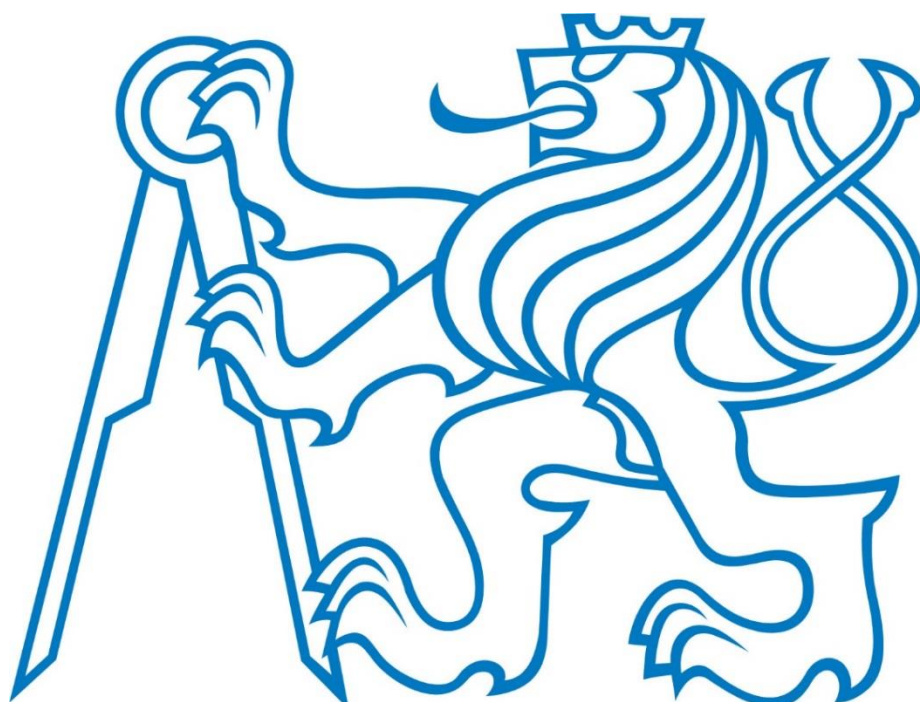


České vysoké učení technické  
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



Perspektivy elektrického pohonu automobilů

Prospects of electric vehicle drivetrain

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Oto Moravec

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Rok: 2016

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Oto Moravec**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Perspektivy elektrického pohonu automobilů**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu pohonných systémů silničních vozidel.
- 2) Proveďte analýzu možných architektur elektrických pohonů silničních vozidel.
- 3) Proveďte rozvalu o výkonových nárocích na energetické sítě v souvislosti s rozvojem elektromobility.

Seznam odborné literatury:

- [1] Čeřovský, Z., Mindl, P.: Influence of Energy Production Technology on Electric Hybrid and Electric Vehicles. Příspěvek na konferenci EVER Monaco 2011
- [2] Kameš, J.: Alternativní pohony automobilů. BEN–technická literatura, Praha 2004
- [3] Vlk, F.: Alternativní pohony motorových vozidel. FVLK Brno 2004

Vedoucí: doc. Pavel Mindl Ing., CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

Ing. Jan Bauer, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Oto Moravec

### **Poděkování**

Mé poděkování patří Doc. Ing. Pavlu Mindlovi, Csc. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

*Název práce:*

Perspektivy elektrického pohonu automobilů

*Autor:* Oto Moravec

*Obor:* Aplikovaná elektrotechnika

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Doc. Ing. Pavel Mindl CSc., Katedra elektrických pohonů a trakce, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

*Abstrakt:* Práce se snaží zachytit současnou situaci automobilového průmyslu a trhu se zaměřením na vozy s elektrickým pohonem. Diskutuje současný stav technologie a snaží se nastínit směr budoucího vývoje. Součástí práce je i rozvaha o vlivu elektromobility na elektrickou síť.

*Klíčová slova:* elektromobil, pohon elektromobilu, alternativní paliva

*Title:*

Prospects of electric vehicle drivetrain

*Author:* Oto Moravec

*Abstract:* This thesis tries to capture current state of automotive industry and market with focus on electric vehicles. Contemporary technology development and possible future prospects are discussed as well as effect of electromobility on electrical grid.

*Key words:* electric vehicle, electric vehicle drivetrain, alternative fuels

## Obsah

1. Předmluva .....	6
2. Úvod .....	6
3. Ústup od spalovacího motoru .....	7
3.1. Současná situace .....	7
3.1.1. Technologie dneška .....	8
4. Nároky na pohonné ústrojí elektromobilu .....	8
4.1. Synchronní motor s permanentními magnety .....	9
5. Zdroje elektřiny pro pohon vozu .....	12
6. Rozvaha o výkonových nárocích na energetické sítě .....	16
6.1. Hypotéza .....	16
6.2. Realita .....	16
6.3. Perspektiva .....	18
6.3.1. Move-and-Charge .....	18
6.3.2. Vehicle-to-Grid .....	19
7. Závěr .....	21
8. Reference .....	21

## 1. Předmluva

Zadání této práce je sice dané třemi jasnými body, nicméně problematika pohonu elektrických vozů a jejich zavádění na trh je tak všestranná a provázaná (zralost technologií z pohledu technického i komerčního, vládní regulace a další politika, přijetí veřejností, skutečný ekologický dopad a jiné), že snažit se všechny tyto aspekty vázat do ostře ohraničených kategorií by sice bylo možné, ale z hlediska organizace tohoto textu a nároků na jeho integritu a kompaktnost jsem se rozhodl zadaných bodů držet poněkud volněji. Jejich vyhotovení se v této práci nachází, ale tato témata jsou sloučena a částečně překryta, aby byla zvýrazněna jejich souvislost.

## 2. Úvod

Spalovací motor slouží lidstvu už více jak sto let. Jeho použití v automobilech umožnilo nebývalý rozvoj přepravy osob a zboží na regionální až mezinárodní úrovni. Jako palivo pro spalovací motor jsou téměř výhradně používána paliva na ropné bázi, která sice nejsou jediná technicky vhodná, jejich užití bylo ovšem po většinu 20. století téměř samozřejmou volbou, převážně z ekonomických důvodů. Ropa je velmi užitečná surovina s nepřebernými možnostmi využití, její užívání ovšem není bezproblémové. Většina světově významných nalezišť leží v politicky méně stabilních oblastech, mimo přímou kontrolu Západu. To představuje riziko přerušovaných či nedostatečných dodávek a následných tzv. ropných krizí v západních ekonomikách. S rozvojem motorismu a průmyslu ale vyplynul na povrch možná ještě palčivější problém - zplodiny vznikající spalováním ropných paliv znečišťují ovzduší a vzhledem k množství těchto zplodin se jedná o problém celosvětových proporcí. Nehledě na to, jak čistě je palivo připraveno (vyrobeno) a jak dokonale je spáleno, nevyhnutelným produktem tohoto procesu bude vždy oxid uhličitý, který je většinou světové akademické obce identifikován jako hlavní činitel tzv. globálního oteplování, což je termín označující proces destabilizace nesmírně komplexního systému zemského klimatu.

Tento mnoha studiemi podložený jev tak přinutil vlády vyspělých států k tvorbě legislativních opatření týkajících se emisí oxidu uhličitého v dopravě a průmyslu. Za posledních 20 let tak došlo k výrazným zlepšením ekonomiky a ekologie provozu automobilu se spalovacím motorem, ovšem za cenu značného nárůstu komplexity celého pohonného ústrojí vozu a s tím související spolehlivosti a citlivosti na řádnou údržbu. Pokroky byly dosaženy v oblastech řízení motoru (řídící jednotky s vysokým výpočetním výkonem, citlivé senzory), přípravě zápalné směsi (vysokotlaké přímé vstřikování paliva), termodynamické účinnosti (přepřehování turbodmychadlem), úpravě zplodin spalovacího procesu (recirkulace výfukových plynů,

katalyzátory, částicové filtry), parazitních ztrát v samotném motoru a transmisích, snížení valivého odporu pneumatik a dalších. Spalovací motor má samozřejmě ještě další prostor pro vývoj, zásadní skok ve zvýšení jeho účinnosti již ale není v tuto chvíli pravděpodobný. Ultimátním krokem využití spalovacího motoru v automobilu je jeho hybridizace, tj. částečná elektrifikace pohonného ústrojí vozu. V takové formě je možné využívat spalovací motor jen selektivně a v pásmech jeho nejvyšší účinnosti. V kombinaci s rekuperací energie při zpomalování vozu je tak dosaženo maximálního možného zužitkování energie obsažené v palivu.

### 3. Ústup od spalovacího motoru

Další možností v ústupu od užívání ropných paliv ve spalovacím motoru je použití tzv. alternativních paliv. Jedná se o uhlovodíková paliva (stejně jako benzin a nafta), ovšem přírodního původu. Tato paliva lze získat zpracováním určitých zemědělských plodin. Tyto rostliny během svého růstu zabudují do své struktury uhlík získaný ze vzdušného oxidu uhličitého pomocí fotosyntézy. Když je takové palivo spáleno, dojde pouze k uvolnění uhlíku, který byl předtím ze vzduchu odebrán a bilance tak zůstává vyrovnaná. K vypěstování těchto plodin je ovšem potřeba orné půdy. Pokud by se mělo vyrobit takové množství přírodních paliv, aby jimi bylo možné zcela či z velké části nahradit ropná paliva, potřeba orné půdy by byla tak velká, že by konkurovala potřebám potravinářského průmyslu a navyšovala tak ceny potravin. I životní prostředí by trpělo, kdyby za účelem co nejvyšších výnosů bylo používáno značné množství hnojiv a velké plochy by byly osazeny jednou a tou samou kulturou. Tato paliva jsou tedy vhodná jen jako částečná náhrada ropných paliv.

Doposud popsaná řešení a metody jsou evidentně pouze mezikrokem k opuštění ropy jako suroviny pro výrobu paliva automobilů. Plná elektrifikace vozidel je zcela jasně trend, kterým se současný trh, průmysl a společnost ubírají.

#### 3.1. Současná situace

Současná situace (2016) je taková, že téměř každý významný výrobce automobilů má v nabídce vůz s elektrickým pohonem. Podíl čistě elektrických vozů (dále EV) v celkovém celosvětovém vozovém parku (tj. přes 1,2 mld. vozidel (OICA, 2015)) je v tuto chvíli zanedbatelný, nicméně podíl na trhu nových vozidel se pohybuje přibližně na úrovni 0,1 % a meziročně rostou počty prodaných EV o desítky procent. V extrémních případech, ve státech s vysokým finančním zvýhodněním při nákupu EV, dosáhly prodeje vysokých jednotek až nízkých desítek procent tržního podílu.



### 3.1.1. Technologie dneška

Použitá technologie trakčního motoru (v některých případech motorů) a akumulátoru v komerčně nejúspěšnějších vozech je uvedena v následující tabulce.

Tabulka 1 Technologie v současnosti nejprodávanějších vozidel

Výrobce	model	kategorie	dojezd all-electric (km)	spotřeba kWh/100km	kapacita baterie (kWh)	technologie baterie	EM1	EM2
BMW	i3	BEV	190	12,9	18,8	Li-ion	PMSM	
BMW	i3 REx	EREV	170	13,5	18,8	Li-ion	PMSM	
GM	Volt/Ampera	PHEV	61	16,9	17	Li-ion	PMSM	PMSM
Mitsubishi	Outlander P-HEV	PHEV	60	13,4	12	Li-ion	PMSM	PMSM
Nissan	Leaf	BEV	200	15	24	Li-ion	PMSM	
Renault	Zoe	BEV	240	14,6	22	Li-ion	SM	
Tesla	Model S (70)	BEV	375	16	70	Li-ion	ASM	
Tesla	Model S (85D)	BEV	502	17	85	Li-ion	ASM	ASM
Toyota	Prius (gen3)	HEV	2	12	1,3	NiMH	PMSM	PMSM
Toyota	Prius Plug-in	PHEV	23	11,5	4,4	Li-ion	PMSM	PMSM
VW	Golf GTE	PHEV	50	11,4	8,8	Li-ion	PMSM	
VW	e-Golf	BEV	190	12,7	24,2	Li-ion	PMSM	

Jak je patrné, v současnosti dominantními technologiemi jsou synchronní motor s permanentními magnety v rotoru a lithium-iontový akumulátor. Tuto skutečnost se pokusím zdůvodnit v následujících kapitolách.

## 4. Nároky na pohonné ústrojí elektromobilu

Základní nároky na pohon silničního elektrického vozu jsou jasné - vysoká účinnost a bezúdržbovost. Tyto nároky tak vylučují stejnosměrné motory s komutátory, což dokazuje i situace na současném trhu. Ze zkoumaného vzorku deseti komerčně nejúspěšnějších elektrifikovaných vozů jich osm používá synchronní motor s permanentními magnety v rotoru, jeden vůz (Tesla Model S) používá asynchronní motor a jeden z vozů (Renault Zoe) využívá synchronní motor s vinutým rotorem. Proč se tyto dva výrobci odklonili od většiny se lze pouze domnívat. U amerických vozů Tesla je velice pravděpodobným vysvětlením, že nepoužití magnetů na bázi prvků vzácných zemin je politicky motivováno (Čína je téměř výhradní producent těchto kovů a z nich vyráběných magnetů (Benecki, 2013)) (Sandalow, 2011). Renault Zoe je kompaktní městský hatchback a pravděpodobně nejdostupnější silniční elektromobil. Rotor jeho motoru má 4 vyniklé póly. Systém řízení motoru tak pravděpodobně využívá možnost

separátně ovládat budící tok rotoru. Mohlo jít o ekonomicky motivovanou volbu a/nebo konstruktérům vozu tato koncepce pro daný účel vyhovovala.

Tabulka 2 Bodově ohodnocené kvality různých typů motorů (Kameš, 2004)

Motor	Cena	Účinnost	Hmotnost	Rozsah $P_{konst}$	Přetížitel- nost	Spolehli- vost	Stav vývoje
Stejnoseměrný	10	7	6	10	10	7	10
Asynchronní	8	8	6	9	10	9	9
Synchronní	8	10	7	10	10	9	8
Synchron. perm. buzení	7	10	8	8	10	10	7
Přepínatelný reluktantní	9	6	7	4	10	9	5
Magnetický (M-M)	8	10	10	8	9	10	8

#### 4.1. Synchronní motor s permanentními magnety

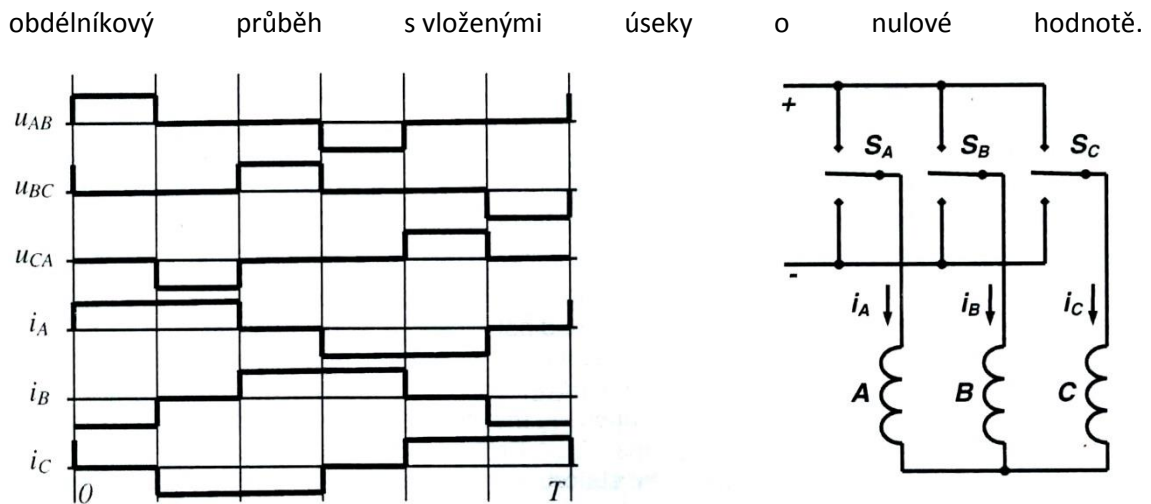
Výhody použití synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM) v porovnání s asynchronním motorem (ASM) a synchronním motorem s vinutou kotvou (SM) jsou shrnuty v následujícím výčtu:

- Vyšší účinnost – magnetické pole rotoru není nutno budit elektrickým proudem.
- Absence vodičů v rotoru zaručuje nižší elektromechanickou konstantu a lepší dynamickou odezvu.
- Jednoduchá konstrukce rotoru umožňuje vyšší spolehlivost stroje.
- Minimální produkce tepla v rotoru a tedy zjednodušení chladičového systému.
- Nižší hmotnost a menší rozměry pro daný výkon.

Tato koncepce má pochopitelně i své nevýhody:

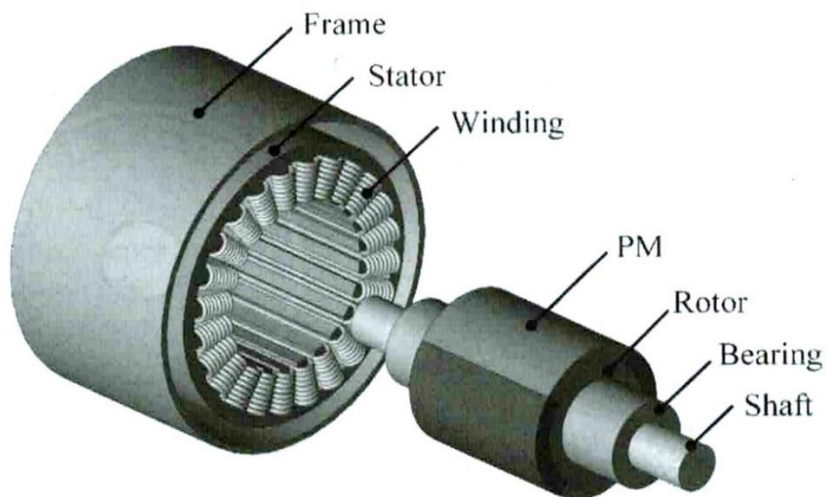
- Vysoká cena daná použitím magnetů ze vzácných zemin.
- Nemožnost ovládní motoru pomocí řízení magnetického toku.

Do skupiny elektrických motorů s permanentními magnety patří také elektronicky komutovaný (EC) bezkartáčový motor. Tento typ motoru je často v anglicky psané literatuře označován jako bezkartáčový stejnosměrný (BLDC – brushless DC). Proud ve vinutí tohoto motoru sice teče oběma směry, napájecí napětí tohoto motoru je ale přepínáno pouze mezi třemi polohami: plně kladné, nulové a plně záporné. Tvar průběhu napětí tak připomíná

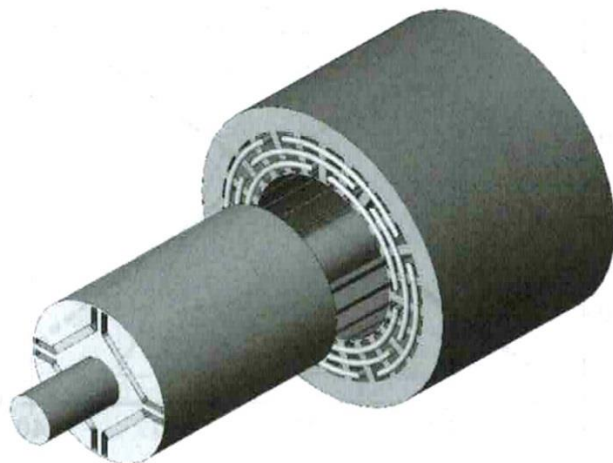


Obrázek 1 EC motor: průběhy fázových proudů a sdružených napětí, schéma zapojení vinutí a střídače

Synchronní motor s permanentními magnety (PMSM neboli BLAC) a EC motor (BLDC) jsou si konstrukčně velmi podobné. Oba typy mají třífázové vinutí statoru, jeho konfigurace je ovšem odlišná. U synchronního stroje je vinutí zpravidla rozprostřené (distribuované), u EC motoru soustředěné (koncentrované). Z toho plyne drobná výhoda EC motoru – vývody vinutí mohou být kratší, snižuje se tak cena, váha a ztráty v mědi. Pro EC motor je dostačující jednoduché provedení snímače polohy rotoru (6 pozic na otáčku) na rozdíl od resolveru / enkodéru s vysokým rozlišením, který je nutný pro provoz synchronního motoru. Výpočetní náročnost řízení BLDC motoru je nižší než u komplexních řídicích strategií střídavých motorů.



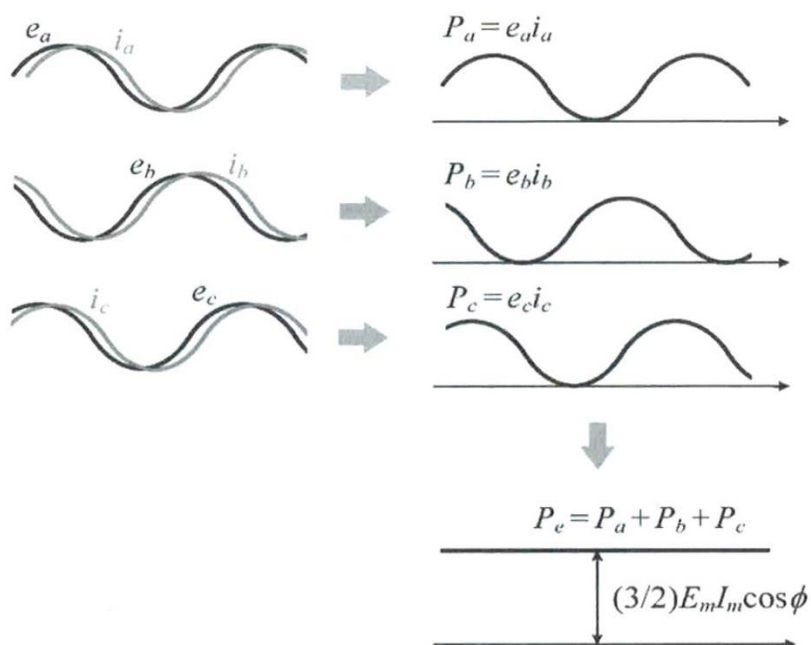
Obrázek 2 BLDC motor



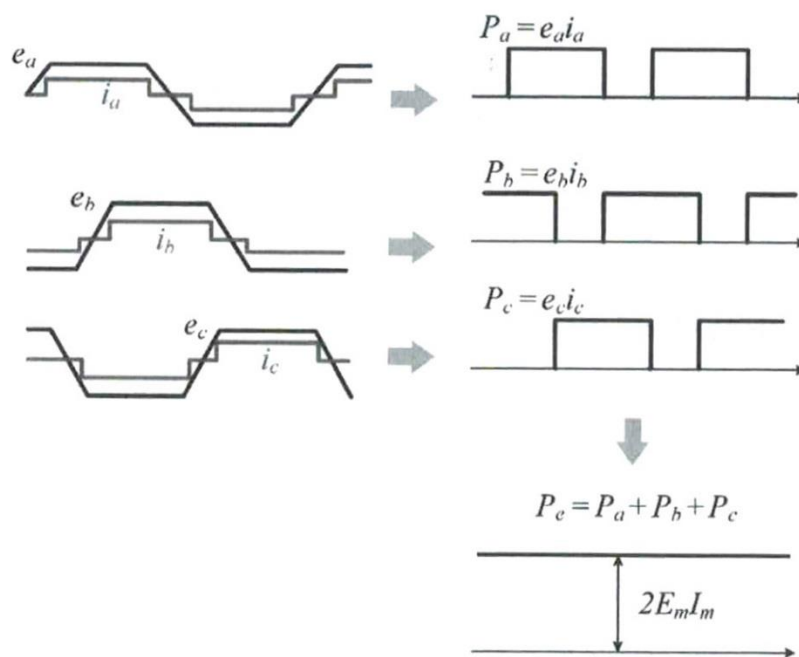
Obrázek 3 BLAC motor

Princip funkce motorů je značně odlišný. Synchronní motor je napájen třífázovým harmonickým napětím, které vytvoří ve statoru rotující magnetické pole. S tímto polem se sváže pole vybuzené permanentními magnety v rotoru a nastane synchronní běh – rotor se otáčí stejnou rychlostí jako točivé pole statoru.

U elektronicky komutovaného motoru jsou aktivní v jeden okamžik vždy pouze dvě fáze. Výsledný vektor statorového magnetického pole se také otáčí, ale skokově po 60 stupních. Distribuce magnetického pole ve vzduchové mezeře je tak u obou typů značně odlišná, u PMSM má sinusový tvar, u BLDC trapézový.



Obrázek 4 Výkon synchronního motoru s permanentními magnety



Obrázek 5 Výkon elektronicky komutovaného motoru

Právě požadavek na tvar průběhu magnetického pole ve vzduchové mezeře si u BLDC motoru vynucuje povrchovou montáž magnetů na rotoru, která ale není vhodná pro vysokootáčkové aplikace. Jelikož v náhonu nápravy automobilu se v podstatě musí vyskytovat alespoň jeden převod (motor-diferenciál), výrobci raději zvolí vysokootáčkový PMSM motor s nižším točivým momentem a patřičným zpřevodováním, než pomaluběžný BLDC motor s vysokým momentem. BLDC motor je tak vhodný spíše pro aplikace s přímým pohonem, s vnitřním statorem a vnějším rotorem. Taková konstrukce ale i u silničního vozidla není vhodná.

## 5. Zdroje elektřiny pro pohon vozu

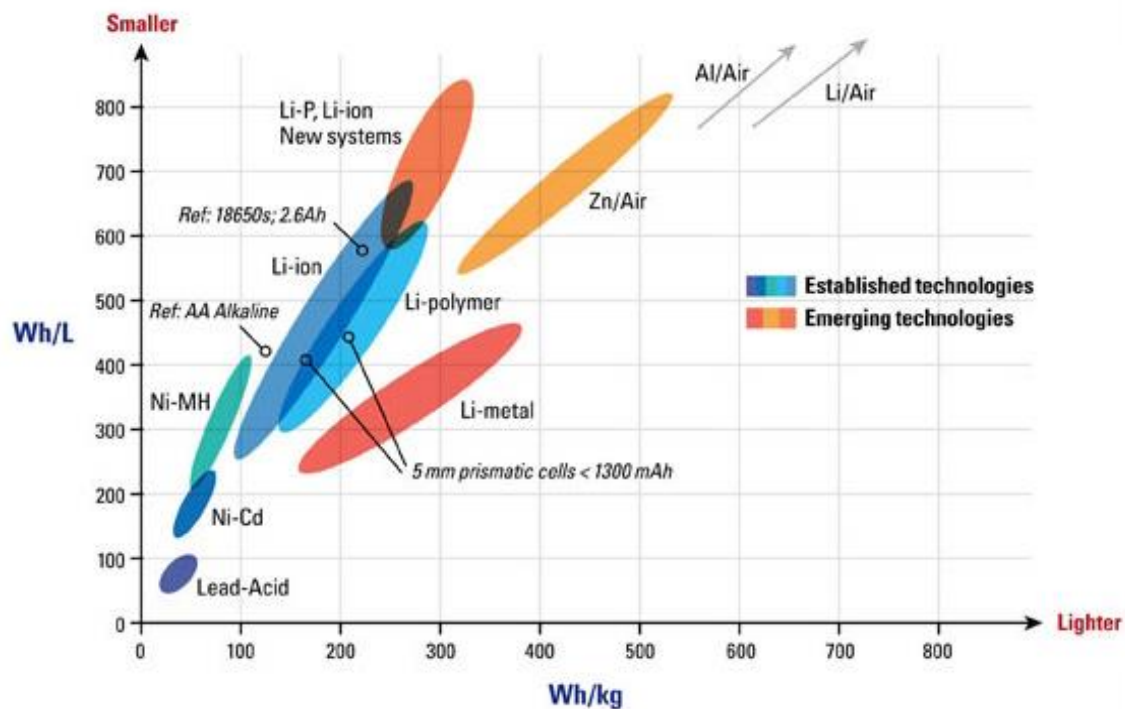
Zatímco technologie elektromotorů je už značně dospělá a pro dnešní využití ji lze považovat za dostatečnou, zásobníky či zdroje energie pro pohon elektromobilů jsou stále v prudkém vývoji a mnoho otázek se zdá být nevyjasněných. Na začátku třetího tisíciletí se zdálo, že cesta vývoje jasně směřuje k vozům poháněným vodíkovým palivovým článkem (h-FCEV). Každý významný výrobce automobilů představoval různé studie, koncepty a funkční prototypy. Ti samí výrobci si ovšem, za uplatnění široké škály konstrukčních řešení, zdárně poradili se zpřísnujícími se legislativními nároky na vozy se spalovacími motory a příchod nové koncepce pohonu automobilu byl tak odložen na neurčito.

Na přelomu první a druhé dekády opět zesílil tlak na zásadní zvýšení čistoty provozu automobilů. Technologie elektrochemických zdrojů (baterií, akumulátorů) mezitím značně

pokročila, možná i díky prudkému nárůstu užívání výkonných mobilních zařízení napříč lidskou populací. Hodnoty objemové a hmotností hustoty energie a výkonu dosáhly úrovně, při které je možno zabudovat akumulátor dostatečné kapacity do osobního silničního vozidla, aniž by se výrazně zvýšila jeho hmotnost, vnější rozměry či byl omezen prostor pro posádku. Ekonomická nákladnost těchto moderních akumulátorů je ovšem značná, což zatím brání rozšíření této technologie do nižších vrstev automobilového trhu. Vývoj v oblasti baterií je velmi čilý a prognózy příznivé. Podle předpovědí (StreetInsider, 2015) by se cena za bateriový svazek mohla v roce 2020 dostat až na úroveň 125 USD/kWh, zatímco dnes činí přibližně 250-300 USD/kWh.

Tabulka 3 Druhy elektrochemických zdrojů a jejich parametry (rok 2004) (Kameš, 2004)

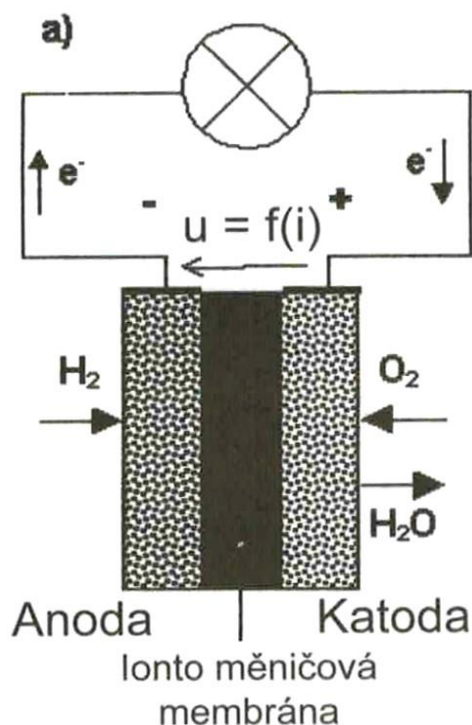
Typ baterie	Hustota energie		Výkonová hustota		Životnost		Cena Euro/kWh
	Wh/kg	Wh/l	W/kg	W/l	cyklů	let	
olovo	30-50	70-120	150-400	350-1000	50-1000	3-5	100-150
nikl-kadmium	40-60	80-130	80-175	180-350	> 2000	3-10*	225*-350
nikl-metalhydrid	60-80	150-200	200-300	400-500	500-1000	5-10*	225*-300
sodík-niklchlorid	85-100	150-175	155	255	800-100	5-10*	225*-300
lithium-iontová	90-120	160-200	300	300	1000	5-10*	275*
lithium-polymer	150	220	300	450	< 1000	-	< 225*
zinek-vzduch	100-220	120-250	100	120	-	-	60*
<b>cílové hodnoty</b>	80-200	135-300	75-200	250-600	600-1000	5-10	90-135



Obrázek 6 Graficky znázorněné kvality různých bateriových technologií (eRally, 2016)

Alternativu dobíjecím elektrochemickým zdrojům nabízí palivový článek. Akumulátory jsou zároveň zásobníky a měniče energie, palivový článek je pouze měničem, potřebuje tak ještě přívod a zásobník paliva, aby mohl generovat elektrický proud. Základní princip je poměrně jednoduchý – dvě elektrody, katoda a anoda, na jednu je přiváděno palivo, na druhou okysličovadlo. Palivo na anodě oxiduje a zbavuje se elektronu, výsledný kladný iont prochází elektrolytem na katodu, kde současně reaguje s okysličovadlem a přijímá elektron. Elektrony jsou nuceny procházet vnějším obvodem a konat práci.





Obrázek 7 Vodíkový palivový článek (Kameš, 2004)

Palivové články jsou klasifikovány na základě materiálu elektolytu. Elektrolýt může být kapalný či pevný. Palivo může být kapalné, pevné nebo plynné, ale jeho skupenství musí být uzpůsobeno struktura anody. Pro provoz v automobilu jsou technicky nejvhodnější články s tuhým organickým polymerem – PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pro vodíkové palivo a DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) pro metanol. Obě paliva ovšem mají své nedostatky - při použití metanolu dochází k emisi oxidu uhličitého a skladování vodíku je technologicky náročné.

Tabulka 4 Různé druhy palivových článků a jejich vlastnosti (Chau, 2015)

	Power level (MW)	Power density (W/cm <sup>2</sup> )	Operating temperature (°C)	System efficiency (%)
DMFC	<0.001	0.04–0.23	90–120	10–20
AFC	<0.1	0.2–0.3	60–100	62
PEMFC	<0.5	0.35–0.6	50–120	30–50
PAFC	<10	0.2–0.25	150–200	40
MCFC	<100	0.1–0.2	600–650	47
SOFC	<100	0.24–0.3	500–1100	55–60

Po roce 2000 byl předurčován palivovému článku rychlý vzestup, tyto představy se ale nenaplnily. Tyto prognózy se z velké části zakládaly na tehdejší neexistenci dostatečně dobré technologie akumulátorů, ale to dnes již neplatí. Nevýhody použití vodíku ovšem přetrvávají dodnes – energeticky náročná výroba a téměř neexistující infrastruktura. I tak rozhodně nelze



palivové články považovat za odepsanou technologii a slepou cestu vývoje. Výzkum v této oblasti (vodíkového PEMFC i ostatních) stále pokračuje a na trhu je v současnosti dostupný jeden vůz, který schopnosti této technologie demonstruje v reálném světě.

Tímto vozem je Toyota Mirai, do prodeje uvedená na konci roku 2015 na vybraných západních trzích. Vůz je poháněn elektrickým motorem o výkonu 114 kW, vodík je stlačený na 70 MPa a uložený ve dvou nádržích vyztužených uhlíkovými vlákny. Vozidlo má dojezd srovnatelný s konvenčními automobily (přes 500 km) a tankovací procedura je uživatelsky téměř totožná (časově i manipulačně). (Toyota, 2015)

## 6. Rozvaha o výkonových nárocích na energetické síť

Jako centrum rozpravy o možném budoucím vývoji jsem si zvolil hlavní město Prahu. Je to region s nejvyšší hustotou zalidnění a nejvyšší průměrnou hrubou mzdou v České republice (Český statistický úřad, 2016). Je tedy odůvodněné předpokládat, že se bude jednat o nejprogresivnější region v zavádění nákladných nových technologií.

Počet vozidel registrovaných v Praze překonal ke konci roku 2015 jeden milion (Centrální registr vozidel, 2016). Nepodařilo se mi nalézt žádná relevantní data ohledně průměrného nájezdu či jízdního vzorce pražského automobilu. Pokusil jsem se tak vytvořit hypotézu běžného jízdního profilu sám na základě svých vlastních zkušeností a situace odpozorované v mém okolí.

### 6.1. Hypotéza

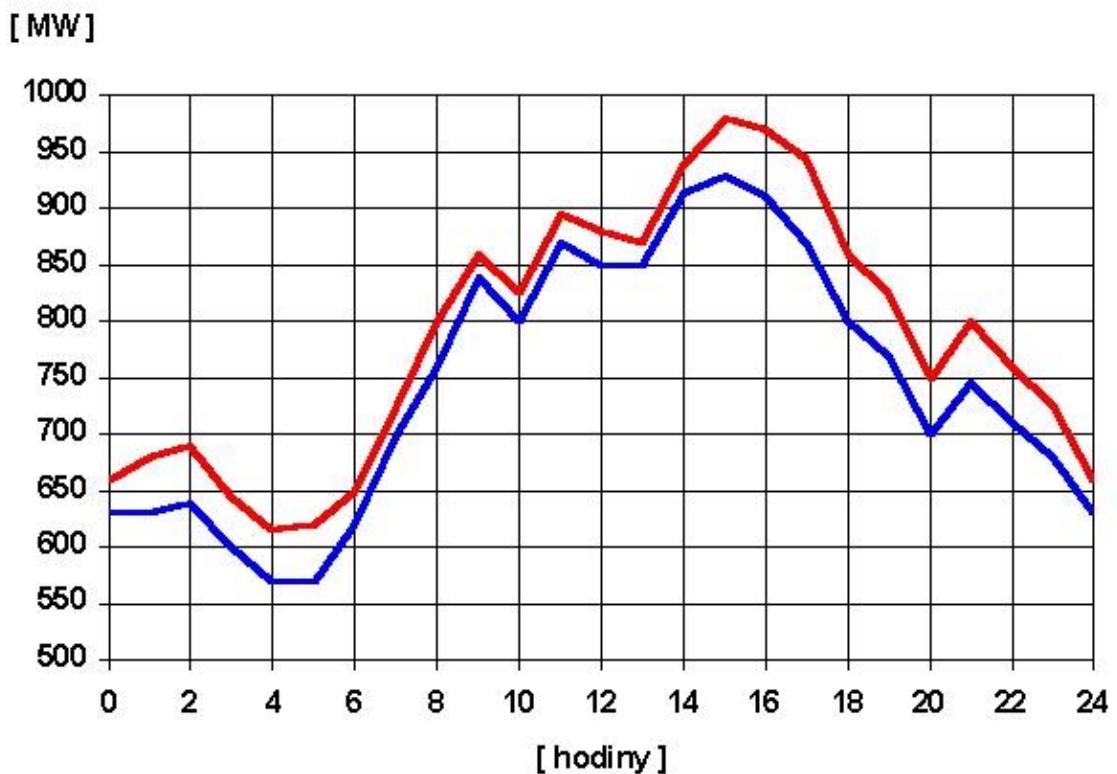
Cesta z okraje Prahy do centra a zpět je dlouhá přibližně 20 km. Určitě mnoho pražských automobilů denně absolvuje delší trasu, ale mnoho jich také nenajede nic. Nezbývá mi tak než použít tento hrubý odhad jako základ výpočtu.

Za předpokladu, že tato typická cesta je vykonána každý pracovní den, dostaneme 100 najetých kilometrů týdně. Nyní zásadní prvek této představy – všechny pražské vozy jsou elektromobily. Obvyklá spotřeba elektrického vozu je asi 15 kWh / 100 km (hodnoty udávané výrobci se pohybují přibližně od 11 do 17 kWh / 100 km, viz Tabulka 1). Jednoduchým výpočtem tak zjistíme, že automobil bude potřebovat pro svůj provoz 15 kWh týdně, tedy 780 kWh ročně. Vozidel je v Praze jeden milion, na jejich provoz bude tedy potřeba 780 GWh/rok.

### 6.2. Realita

Nyní konfrontace s reálnými daty. Společnost PRE ve své výroční zprávě 2015 (Pražská energetika, a.s., 2016) uvedla, že Praze za uplynulý rok dodala přibližně 6,1 TWh energie. Objem energie nutné pro pohon vozidel by tak neznamenal zásadní nárůst spotřeby metropole.

Skutečný problém ale může tkvět v nárocích na okamžitý odběr energie, tedy na výkon. Dále opět nezbývá, než si vybudovat hypotézu. Dle mého názoru je absolutně nerealistické se domnívat, že by všechna vozidla byla nabíjena v jeden okamžik. Dále, i přes existenci a rozmach rychlonabíjecích stanic, lze předpokládat, že většina majitelů vozidel bude pro noční nabití vozu užívat běžnou „domácí“ jednofázovou nabíječku – ta má příkon 3,6 kW, aby byla únosná pro 16A jistič. Pokud se tedy, v nejhorším případě, bude v jednu chvíli nabíjet polovina všech vozů, tj. půl milionu, výkonem 3,6 kW, bude výsledné zatížení 1,8 GW. Společnost PRE ve své výroční zprávě 2015 uvedla (Pražská energetika, a.s., 2016), že rekordní zatížení pražské distribuční sítě dosáhlo hodnoty lehce přes 1,2 GW (v prosinci 2014) a na jejích webových stránkách (PREdistribuce, a.s., 2016) se lze dočíst, že instalovaný transformační výkon VVN/VN, tedy 110/22 kV, činí 2815 MVA. Lze tak jen porovnat tyto hodnoty a usoudit, že řádově se zdají v pořádku. Pohledu na denní diagram zatížení budí dojem, že pro noční nabíjení vozů skutečně existuje prostor.



Obrázek 8 Denní diagram zatížení sítě

Větší potíže než s hrubým maximálním odebíraným výkonem tak může nastat spíše s fázovou nesymetrií zatížení sítě a zarušením sítě vyššími harmonickými složkami vyprodukovanými vysokým počtem poměrně výkonných zařízení připojených v jednu chvíli. Hlubší zkoumání si už vzhledem ke svým znalostem netroufám provést. Sestavení modelu ve vhodném výpočetním softwaru by jistě nabídlo lepší odpovědi.

### 6.3. Perspektiva

Budoucnost však pravděpodobně nabídne inteligentnější řešení než prosté připojování nabíječek do sítě. Dvě perspektivní možnosti jsou techniky zvané Vehicle-to-Grid a Move-and-Charge.

#### 6.3.1. Move-and-Charge

Technika Move-and-Charge umožňuje dobíjení vozidla za jízdy pomocí indukativní technologie bezdrátového přenosu energie.

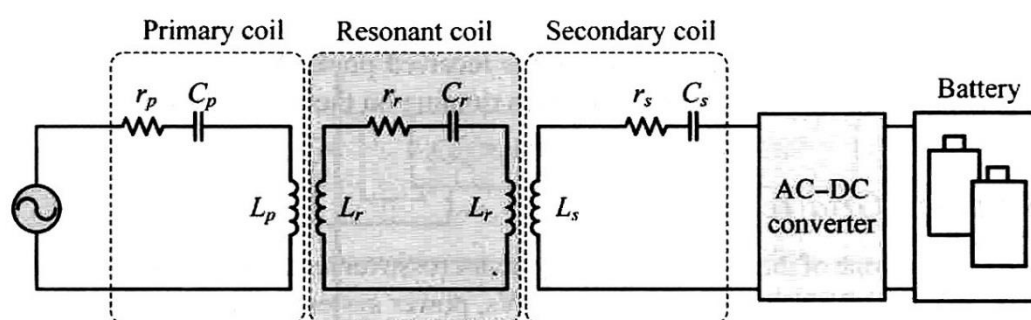
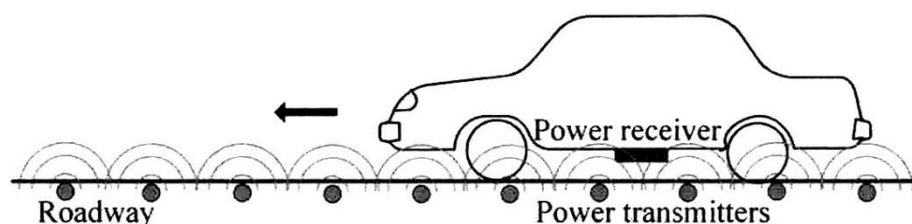


Figure 1.10 Magnetic resonant coupling-based EV charging



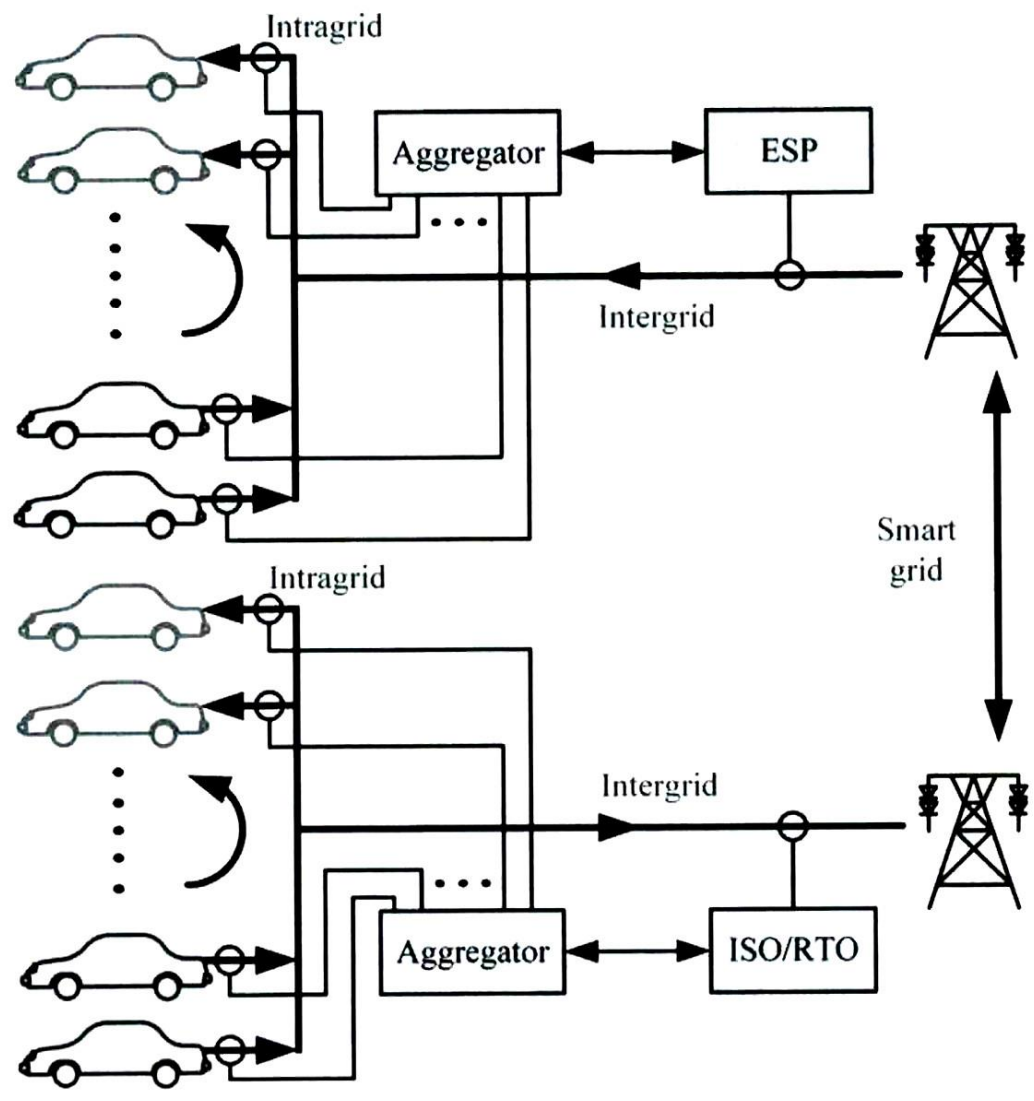
Obrázek 9 Koncepte technologie Move-and- Charge (Chau, 2015)

Idea je taková, že pod vozovkou jsou zabudovány emitory magnetického pole a vozidlo tak může přijímat energii za jízdy. Existuje pochopitelně mnoho překážek, než se takováto technologie může dostat do produkčního stádia. Proměnná vzdálenost vozidla od povrchu (dle zatížení a terénu), rychlost vozidla, vzájemná poloha vysílače a přijímače a v neposlední řadě také zabezpečení proti neoprávněnému odběru energie. Tyto záležitosti a ještě další budou muset být řídicím systémem zpracovávány v reálném čase. Způsob tohoto přenosu energie již byl demonstrován s výkonem 100 kW a průměrnou účinností 75 % (Chau, 2015).

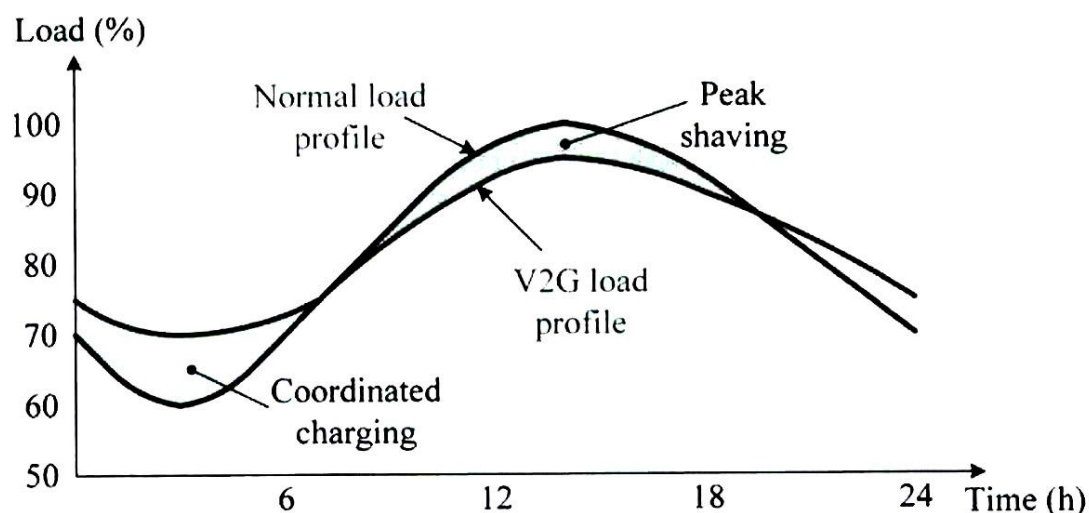
Pokud by se tato technologie v reálném světě uplatnila a četnost rozmístění nabíjecích pruhů by dosáhla dostatečné úrovně, mohlo by se to projevit i na konstrukci vozů. Nebylo by nutné užívat vysokokapacitní akumulátory, kdyby vzdálenosti mezi jednotlivými dobíjenými byly krátké.

### 6.3.2. Vehicle-to-Grid

Technika Vehicle-to-Grid (V2G) je velmi zajímavá z perspektivy elektrické rozvodné sítě i koncového uživatele (majitele vozu). Běžný automobil tráví naprostou většinu času zaparkovaný. Pokud je v jednu chvíli k elektrické síti připojeno více vozidel, disponují nezanedbatelnou akumulací kapacitou. Pokud by elektrická síť s těmito vozidly dokázala komunikovat, mohla by této skutečnosti využívat ve svůj prospěch – při špičkové zátěži sítě z vozů energii čerpat, při minimálním odběru domácností a podniků vozy dobíjet (koordinované dobíjení). Aby byl celý systém co nejefektivnější, mezi síť a skupinu elektrických vozů je zařazen tzv. agregátor, který slouží jako energetický akumulací prvek a prostředník v komunikaci sítě a vozidel. Síť tak komunikuje pouze s agregátorem, nemusí se starat o počet připojených vozidel či stav nabití jejich baterie. V agregátoru se tak vlastně musí skrývat inteligence systému. Nejen že bude muset komunikovat s využívanými vozy, bude muset používat vhodné strategie vybíjení jejich baterií - maximálně ohleduplné k jejich životnosti (bylo by hloupé plýtvat životností baterie elektromobilu při stacionárním užití; u současných baterií obvykle platí, že ideální je pohybovat se mezi 40 až 80 % stavu nabití) – a třeba i nabídnout majiteli vozu službu plného nabití na předem sjednaný čas. Otázka technologie uložení elektrické energie má také mnoho různých odpovědí – vyzkoušené, spolehlivé a relativně levné olovené baterie či jiné pokročilejší systémy, třeba jako setrvačnické (se všemi pozitivy stacionární zástavby). Agregátor navíc nemusí operovat exkluzivně s energií z elektromobilů, může ukládat a užívat i energii z menších lokálních obnovitelných zdrojů (FV panely, větrné elektrárny aj.) a nezanedbatelně tak koordinátorům distribuční a přenosové soustavy ulehčit práci (a vyhnout se ztrátám několikanásobnou transformací a dálkovým přenosem). Technologie V2G-G2V navíc i dává prostor k tvorbě nových obchodních modelů – majitel vozu může na své účasti ve V2G profitovat díky rozdílné ceně elektřiny při maximálním a minimálním zatížení sítě. Realisticky zní i představa, kdy baterie vozů vlastní přímo energetický závod či jiná společnost a majitel vozu si tak baterii za určitý pravidelný poplatek pouze pronajímá – odpadá mu tak starost o životnost a případný servis baterie.



Obrázek 10 Schéma technologie Vehicle-to-Grid



Obrázek 11 Koordinované nabíjení a jeho vliv na zatížení sítě

## 7. Závěr

Při tvorbě této práce jsem se snažil nabídnout čtenáři širší úhel pohledu na současnou situaci a neomezit se jen na prostý výčet technických možností. Téma elektrických vozidel je velice živé a aktuální a se zvyšující se penetrací na automobilovém trhu a zájmem velkých společností i jejich zákazníků bude tempo vývoje v této oblasti jistě dále narůstat. Automobilový průmysl tak nabídne více pracovních pozic odborníkům v elektrotechnice a informačních technologiích než kdy dříve.

## 8. Reference

**Benecki, Walter T. 2013.** *The Permanent Magnet Market*. [Prezentace] Orlando, USA : Magnetics 2013 Conference, 2013.

**Burress, T. A., a další. 2011.** *Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive system*. [PDF dokument] Washington, D.C., USA : U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, 2011.

**Centrální registr vozidel. 2016.** Statistika registru silničních vozidel v hl. m. Praze. *Praha.eu (Portál hlavního města Prahy)*. [Online] 2016. [Citace: 22. 5. 2016.] [http://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/automobilova/statistiky\\_ridicu\\_a\\_vozidel/statistika\\_registru\\_silnicnich\\_vozidel/](http://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/automobilova/statistiky_ridicu_a_vozidel/statistika_registru_silnicnich_vozidel/).

**Český statistický úřad. 2016.** Průměrné hrubé měsíční mzdy v Praze ve 4. čtvrtletí 2015. *Český statistický úřad | ČSÚ.* [Online] 11. 3. 2016. [Citace: 20. 5. 2016.] <https://www.czso.cz/csu/xa/prumerne-hrube-mesicni-mzdy-v-praze-ve-4-ctvrtleti-2015>.

**eRally. 2016.** eRally – at the cutting edge of EV technology. *Motorsport for the 21st Century.* [Online] 2016. [Citace: 25. 5. 2016.] <http://www.eraly.co.uk/technology.php>.

**Chau, K. T. 2015.** *Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application.* Singapore : IEEE Wiley, 2015.

**Kameš, Josef. 2004.** *Alternativní pohony automobilů.* Praha : BEN - technická literatura, 2004.

**OICA. 2015.** Vehicles in use. *Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles.* [Online] 2015. [Citace: 18. 5. 2016.] <http://www.oica.net/wp-content/uploads//total-inuse-2014.pdf>.

**Pavelka, Jiří a Zděnek, Jiří. 2015.** *Elektrické pohony a jejich řízení. 2. vydání.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2015.

**Pázral, Emil. 2009.** Integrace větrné energetiky do nadřazených systémů. *Emil Pázral.* [Online] 2009. [Citace: 22. 5. 2016.] [http://stary.biom.cz/clen/ep/a\\_vitr.html](http://stary.biom.cz/clen/ep/a_vitr.html).

**Pražská energetika, a.s. 2016.** *PRE.* [Online] 2016. [Citace: 23. 5. 2016.] <https://www.pre.cz/Files/profil-spolecnosti/o-nas/vyrocnizpravy/2015/>.

**PREdistribuce, a. s. 2016.** Technické informace. *PREdistribuce, a. s.* [Online] 2016. [Citace: 21. 5. 2016.] <https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/technicke-informace/>.

**Sandalow, David, a další. 2011.** *Critical Materials Strategy.* [PDF dokument] Washington, D.C., USA : U.S. Department of Energy, 2011.

**StreetInsider. 2015.** *Jeffereis Sees 1,000bps of GM Tailwind for Tesla (TSLA); PT Up to \$365.* [článek] 17. 9. 2015.

**Toyota. 2015.** *Toyota Motor Sales, USA, Inc.* [Online] 2015. [Citace: 10. 5. 2016.] <https://ssl.toyota.com/mirai/assets/modules/carprice/2016-Mirai-Product-Sheet.pdf>.

**Vlk, František. 2004.** *Alternativní pohony motorových vozidel.* Brno : František Vlk, 2004.