



# Fakulta elektrotechnická Regionální inovační centrum elektrotechniky

# Strategie řízení bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů

Pracoviště:	Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Číslo dokumentu:	22190-012-2020
Typ zprávy:	Výzkumná zpráva
Řešitelé:	Martin Zavřel, Pavel Drábek, Vladimír Kindl, Tomáš Kavalír
Vedoucí projektu:	Zdeněk Peroutka
Počet stran:	50
Datum vydání:	8. 7. 2020
Oborové zařazení:	2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

# Zadavatel / zákazník:

Západočeská univerzita v Plzni Regionální inovační centrum elektrotechniky Univerzitní 8 306 14 Plzeň

### **Zpracovatel / dodavatel:**

Západočeská univerzita v Plzni Regionální inovační centrum elektrotechniky Univerzitní 8 306 14 Plzeň

### Kontaktní osoba:

Ing. Martin Zavřel tel. 377634420 zavrelm@rice.zcu.cz

**Poděkování:** Tato zpráva a kondenzátory vznikly za podpory projektu SGS-2018-009: Výzkum a vývoj perspektivních technologií v elektrických pohonech a strojích III. A s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu OP VVV Elektrotechnické technologie s vysokým podílem vestavěné inteligence, číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/18\_069/0009855

# Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá návrhem a implementací řídících algoritmů pro bezdrátovou nabíjecí stanici elektromobilů. Popisované řízení je řešeno jako komplexní řetězec zahrnující zdroj a připojení k distribuční síti, samotný bezdrátový přenos výkonu a nabíjení baterie elektromobilu ve spolupráci s battery-managementem. Teoretický návrh je podpořen simulacemi v prostřední Matab-simulink a ověřen implementací v 5kW prototypu systému WPT. Hlavní cílené parametry jsou zajištění napětí a proudu na nabíjeném akumulátoru, udržení optimálních podmínek pro bezdrátový přenos výkonu a zajištění kvalitního odběru energie z distribuční sítě, tj. dosažení maximální možné účinnosti nabíjecí stanice a kvality nabíjení baterie.

# Klíčová slova

Bezdrátový přenos výkonu, bezdrátová nabíjecí stanice, řízení, nabíjení baterie, měření.

# **Report title**

Control Strategy for Wireless Charging Stations of Electric-Vehicles.

# Abstract

This research report deals with wireless charging station for electric vehicles control algorithms design and implementation. Described control is comprehensively solved including power grid connection and power source, wireless power transfer itself and battery charging with battery management cooperation. The theoretical design is supported by simulations in Matlab-Simulink and verified by implementation in 5kW wireless power transfer prototype. Main targets are: ensuring voltage and current for battery charging, maintaining optimal conditions for wireless power transmission and ensuring high-quality power consumption from the power network. That is, achieving the maximum possible charging station efficiency and battery charging quality.

# Keywords

Wireless Power Transfer, wireless charging station, control, battery charging, measurement.

# Seznam symbolů a zkratek

WPT	Wireless Power Transfer (bezdrátový přenos výkonu)
EV	Elektrické vozidlo
3LNPU	třífázový napěťový pulzní usměrňovač
FOM	figure of merit
CC-CV	constant current – constant voltage – nabíjecí cyklus baterie
DD	double-D - tvar vinutí
DAPLL	digitálně-analogový fázový závěs
ADC	analogově digitální převodník
DSP	digitální signálový procesor, též μC
μC	mikro kontrolér, též DSP
FOD	foreign and live object detection
DC	stejnosměrný
MHD	městská hromadná doprava

# Obsah

ANOTACE	2
KLÍČOVÁ SLOVA	2
REPORT TITLE	2
ABSTRACT	2
KEYWORDS	2
SEZNAM SYMBOLŮ A 7KPATEK	2
2 TOPOLOGIE VYKONOVYCH PRVKU	7
3 VSTUPNÍ POZNATKY	8
3.1 Pro Řízení	
3.2 PRO VYKONOVOU TOPOLOGII A RIZENI	9
3.4 VLASTNOSTI BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU VÝKONU (SYSTÉMU WPT)	
4 NÁVRH ŘÍZENÍ	
	15
	15
4.3 CCCV POMOCÍ 3LNPU	
4.3.1 DCDC měnič	
4.3.2 3LNPU	18
4.3.3 Vstupní střídač	19
5 REALIZACE ŘÍZENÍ	20
5.1 Vstupní střídač	20
5.1.1 Vstupní střídač – simulace	22
5.2 3LNPU	25
5.2.1 3LNPU simulace	26
5.3 Sekundární část	28
5.3.1 Sekundární část - simulace	29
5.4 Softwarové ochrany a komunikace	33
6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE	
6.1 Měřící stanoviště	34
6.2 Výsledky měření	37
6.2.1 Záznam nabíjení baterie	37
6.2.2 Oscilografy z nabijeni baterie	40
6.3 POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH MOŽNOSTÍ ŘÍZENÍ Z KAPITOLY 4	43
7 ZÁVĚR	44
LITERATURA	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	46
SEZNAM TABULEK	47
HISTORIE REVIZÍ	47
ΡŘΊLΟΗΥ	48

# 1 Úvod

Elektro-mobilita je rychle se rozvíjejícím průmyslovým odvětvím a v současné době také nejrozšířenější alternativou k vozidlům se spalovacími motory (nafta, benzín, plyn aj.). Energie pro pohon elektromobilu je skladována zpravidla v akumulátorech, které co do funkce tvoří alternativu běžné nádrže, či tlakové lahve (u plynového pohonu). Doplňování běžných nádrží je prováděno výhradně na čerpacích stanicích s hustou sítí. Nabíjení akumulátorů je však možné rozdělit na několik úrovní a to domácí nabíjení, nabíjení na veřejných dobíjecích stanicích a nabíjení na privátních dobíjecích stanicích. Právě nabíjení v domácím a privátním prostředí je velmi příznivé a pohodlné. Na druhou stranu, pro potřeby dlouhých cest, je současná síť veřejných dobíjecích stanic relativně řídká a je tak třeba cestu dobře naplánovat. Avšak s tím, jak stoupá počet elektromobilů, tak velmi rychle houstne i síť veřejných dobíjecích stanic.

Běžné dobíjecí stanice se z pohledu přenosu energie rozdělují na stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrné dobíjecí stanice se skládají zpravidla z nepřímého měniče kmitočtu s galvanickým oddělením a usměrňovače. Ty střídavé jsou pak založeny zpravidla na nepřímém měniči kmitočtu s využitím palubní nabíjecí stanice (Obr. 1). Spojení mezi vozidlem a dobíjecí stanicí zprostředkovává výkonový kabel, který u vysokorychlostních dobíjecích stanic bývá velmi často aktivně chlazený. Na palubě vozidla se pak AC nabíecích stanice nachází usměrňovač + DCDC měnič, který finálně upravuje napětí a proud pro potřeby nabíjení akumulátoru na základě battery managementu.



Obr. 1.4 Schéma indukčního nabíjení

Alternativou ke kabelovým dobíjecím stanicím jsou bezdrátové dobíjecí stanice elektromobilů. Takovéto dobíjecí stanice nahrazují kabelové propojení mezi dobíjecí stanicí a vozidlem bezdrátovým přenosem výkonu. Zbývající Topologie bezdrátové dobíjecí stanice je velmi podobná topologii střídavé kabelové dobíjecí stanice. Tímto vzniká celá řada nových

Obr. 1 Topologie kabelových dobíjecích stanic [1]

možností. Tou pro člověka nejpřínosnější je absence rutinních úkonů, jako je otevření konektoru, připojení kabelu a zapnutí nabíjení. Další benefit bezdrátového dobíjení elektromobilů lze spatřit v krátkodobém dobíjení na parkovacích stáních supermarketů, světelných křižovatkách apod. Opomenou pochopitelně nelze ani dnes vznikající smart city a smart grid, kde může bezdrátové dobíjení plnit funkci stabilizace distribuční sítě formou sdílených baraterií.



Obr. 2 Topologie bezdrátové dobíjecí stanice

Pokud tedy odpadne zmíněný rutinní úkon, je možné celý proces spuštění nabíjení a samotného nabíjení plně automatizovat. Uživatelé osobních elektromobilů toto z podstaty člověka náležitě ocení. Pokud však uvážíme vysoko výkonové bezdrátové dobíjecí stanice, je možné a to velmi pohodlně, dobíjet vozy MHD na zastávkách, "konečných stanicích, na světelných křižovatkách apod.

Na obě skupiny potenciálních aplikací bezdrátového dobíjení elektromobilů je zaměřeno řízení bezdrátové dobíjecí stanice, které je předmětem této výzkumné zprávy. Jak z úvodu vyplívá, řízení bezdrátové dobíjecí stanice (a pochopitelně i její hardware) musí umožnit bezobslužný, automatický proces dobíjení a zajistit srovnatelnost s kabelovými dobíjecími stanicemi co do přenášených výkonů, účinností apod.

Tato Výzkumná zpráva se zabývá návrhem a implementací řízení pro bezdrátovou nabíjecí stanici s cílem zajistit automatický proces nabíjení, vysokou přenosovou účinnost bezdrátového přenosu výkonu a vysokou účinnost celé bezdrátové dobíjecí stanice. Návrh a implementace takovéhoto řízení jsou úzce spjaty s návrhem a realizací hardware bezdrátové dobíjecí stanice. Poroto je i ten ve zprávě několikrát vzpomenut, avšak pro detaily je odkazováno na výzkumnou zprávu 22190-011-2020, která se zabývá primárně hardware bezdrátové nabíjecí stanice.

Návrh řízení (a související návrh hardware) je cílen na 50kW prototyp bezdrátové dobíjecí stanice. Jak je dále v práci vzpomenuto, topologicky je hardware i řízení 50 kW stanice shodné s 5 kW, což umožňuje využití stávajícího prototypu 5 kW dobíjecí stanice pro laboratorní ověření navrženého řízení před realizací 50 kW prototypu. Takováto možnost je velice výhodná a to jak ekonomicky, tak z pohledu návrhu. Implementaci řízení a laboratornímu ověření předcházelo v práci popsané simulační ověření návrhu regulace a hardware, které je provedené pro 50kW prototyp.

Tato výzkumná zpráva tedy zprostředkovává ucelený a detailní přehled o řízení bezdrátové nabíjecí stanice o prototypových výkonech 5 a 50 kW v souvislostech s navrženým a realizovaným hardware těchto prototypů.

# 2 Topologie výkonových prvků

Pro kvalitní návrh řízení bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů je znalost topologie výkonových prvků nezbytná. Tato je uvedena na Obr. 3 a v příloze 1 v podobě přehledového schéma výkonových prvků 50kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice. Toto schéma je co do topologie i aplikovaného řízení shodné s 5kW prototypem nabíjecí stanice, na kterém je provedena referenční implementace řízení popsaného v této zprávě.

Poznámka: Návrh výkonové části 50kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů není předmětem této zprávy. Naopak řízení uvedené v této zprávě bude aplikované na 50kW prototypu. Návrhem výkonové části se zabývá výzkumná zpráva 22190-011-2020

Topologie výkonových prvků sestává v těchto bloků:

- vstupní 3-fázový filtr 3LNPU
- napěťový pulzní usměrňovač *3LNPU*
- 1. DC meziobvod
- 1-fázový střídač (H-můstek) střídač
- bezdrátový přenos výkonu WPT
- můstkový usměrňovač
   usměrňovač
- 2. DC meziobvod
- DC/DC měnič (snižující topologie) DC/DC
- 3. DC meziobvod
- Baterie

Jednotlivé bloky na sebe logicky navazují dle Obr. 3 (a Přílohy 1) a je možné na ně navrhnout a aplikovat řízení. Jednotlivé obvodové veličiny pro navrhovaný 50kW prototyp jsou také uvedeny v Příloze 2.

Vstupní úvahy o možnostech řízení zachycuje následující kapitola.



Obr. 3 Výkonová topologie bezdrátové nabíjecí stanice

#### 3 Vstupní poznatky

Vstupní poznatky pro návrh řízení vycházejí z dosavadního vývoje samotného bezdrátového přenosu výkonu (5kW prototypu). Tedy z návrhů a simulací vazebných elementů a jejich chování v reálném provozu a při různých parametrech. Tato kapitola popisuje hlavní ukazatele pro návrh řízení bezdrátové nabíjecí stanice. Problematiku vstupních poznatků pak dokresluje Obr. 4.

#### 3.1 Pro řízení

Z návrhů, simulací a testování vazebných elementů jsou pro řízení stěžejní tři poznatky:

- $\eta_{\text{trans}} a P_2 = f(f_1)$
- $\eta_{\text{trans}} a P_2 = f(R_L)$
- $\eta_{\text{trans}} a P_2 = f(U_1)$

Závislost přenosové účinnosti  $\eta_{trans}$  a přeneseného výkonu  $P_2$  na pracovním kmitočtu  $f_1$  systému WPT se řídí obecně platnými zákony o rezonanci a rezonančních, magneticky vázaných obvodech v čele s Thomsonovým vztahem, který je v použité podobě uveden v (1). (2) dále zpřesňuje úvahy o definici vzájemné indukčnosti M s činitelem vazby k mezi vysílacím a přijímacím elementem menším jedné. K je přitom závislé především na změnách vzájemné polohy vysílacího a přijímacího elementu systému WPT. Není však možné vyloučit také jeho závislost na vstupním napětí  $U_1$  či přenášeném výkonu  $P_2$  (8).

$$f_1 = f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} a f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_2 \pm M)C_2}}; L_1 = L_2 = L, C_1 = C_2 = C$$
 (1)

$$M = kL \tag{2}$$

Poznámka: Systém WPT v uvažované podobě využívá pro přenos výkonu magnetickou, rezonanční, sério-sérivoě kompenzovanou vazbu. Pro správnou funkčnost je nutné udržovat f<sub>1</sub> na hlavním rezonančním kmitočtu této vazby.

Základní rovnicí pro uvažovanou topologii vazebných elementů je:

$$\begin{bmatrix} i_1\\i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\left(\omega_{\mu}L - \frac{1}{\omega_{\mu}c_1}\right) & -j\omega_{\mu}M \\ -\omega j_{\mu}M & R_2 + R_L + j\left(\omega_{\mu}L_2 - \frac{1}{\omega_{\mu}c_2}\right) \end{bmatrix} \quad \backslash \begin{bmatrix} \frac{2\sqrt{2}u_{m1}}{\pi\mu} \\ 0 \end{bmatrix},$$

kde  $\mu$  je řád dané harmonické napájecího napětí  $u_1$  generovaného střídačem o  $u_{m1} = U_{DC1}$  a  $\omega_{\mu=0} = 2\pi f_1$ .

Z této rovnice je možné odvodit následující vztahy a vlastnosti.

Závislost přenosové účinnosti  $\eta_{trans}$  a přeneseného výkonu  $P_2$  na ekvivalentním zátěžném odporu  $R_L$  systému WPT zachycuje (3). Vyjádřením  $R_L$  z (3) dostaneme pro případ optimalizace na maximální přenášený výkon (5) a pro případ maximální přenosové účinnosti (4). Dále platí splnění (1).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\omega^4 M^2 R_L C_2^2}{R_1 + C_2 R_1 [C_2 (R_2 + R_L)^2 - 2L_2] \omega^2 + C_2^2 [L_2^2 R_1 + M^2 (R_2 + R_L)] \omega^4}; R_1 = R_2 = R$$
(3)

$$R_{L(\eta \to max)} = \sqrt{R^2 + M^2 \omega^2} \frac{\pi^2}{8}$$
(4)

$$R_{L(P_2 \to max)} = \sqrt{\frac{C^2 M^4 \omega^6}{(CL\omega^2 - 1)^2}} \frac{\pi^2}{8}$$
(5)

Závislost přenosové účinnosti  $\eta_{trans}$  a přeneseného výkonu  $P_2$  na  $U_1$  zachycuje (6), která vychází z ekvivalence výkonů na vysílací a přijímací straně při započtení přenosové účinnosti. Za předpokladu zajištění (4) je přenosový poměr vazebných elementů p rovný téměř jedné a lze psát (7). Odchylky od p=1 navrhovaná regulace vyeliminuje (kapitola 4.3).

$$P_2 = P_1 \eta \rightarrow P_2 = \frac{p^2 U_1^2}{R_L}; p \check{r} i zanedbání ztrát$$
(6)

$$P_2 \approx \frac{U_1^2}{R_L} \approx I_1^2 R_L \tag{7}$$

#### 3.2 Pro výkonovou topologii a řízení

Z návrhů, simulací a testování vazebných elementů je pro volbu výkonové topologie důležité zejména:

Závislost přenosové účinnosti  $\eta_{trans}$  a přeneseného výkonu  $P_2$  na FOM (figure of merit), respektive na vzájemné indukčnosti, je popsána vztahem (8). Zde je zřejmá přímo úměrná závislost mezi velikostí  $U_1$  a M a nepřímo úměrná závislost mezi  $P_2$  a  $U_1$ . Zjednodušeně je tedy možné tvrdit, že pro přenos velkých výkonů ( $P_2$ ) s velkou přenosovou účinností ( $\eta_{trans}$ ) je výhodné navýšit vstupní napětí  $U_1$ , tedy  $U_{DC1}$ , tedy FOM.

$$FOM \approx M = \frac{U_1}{\omega_0} \sqrt{\frac{R_L}{P_2}} = \frac{8}{\pi^2} \frac{U_1^2}{\omega_0 P_2}$$
 (8)

Vztah (8) také podporuje předchozí poznatky stěžejní pro řízení a naopak.



Obr. 4 Detail výkonového obvodu – blokový

#### 3.3 Definování zátěže

Poslední článkem řetězce bezdrátové nabíjecí stanice je nabíjená baterie, tedy spotřebič přenášeného výkonu. Trakční baterie jsou nejčastěji nabíjené známým cyklem CC-CV (constant current – constant voltage), během kterého nejprve roste napětí akumulátoru při konstantním (zpravidla maximálním možném) nabíjecím proudu a po dosažení maximálního (požadovaného) napětí akumulátoru nabíjecí proud pozvolně klesá při konstantním napětí. Tento děj je možné popsat rovnicemi (9,10,11,12). Z rovnice (9) je zřejmý postupný nárůst napětí baterie  $U_{bat c}$  v závislosti na její kapacitě  $C_{bat}$  vnitřním odporu  $R_{int}$  a rozdílem vnitřního  $u_{int}$  a přiloženého  $u_{bat}$  napětí (v a na akumulátoru).

$$U_{bat c} = \frac{U_{bat max}}{Q_{bat max}} \int_0^t \frac{u_{bat (t)} - u_{int (t)}}{R_{int}} dt ; u_{bat (t)} \le U_{bat max}$$
(9)

Na základě (9) lze definovat velikost nabíjecího proudu (proudu baterií) jako (10) a definovat její ekvivalentní nabíjecí odpor jako (11).

$$I_{bat} = \frac{U_{bat} - U_{int}}{R_{int}}$$
(10)

$$R_{bat \ eqv} = \frac{U_{bat}}{I_{bat}} \tag{11}$$

Rovnice (12) plní pouze formální charakter definice kapacity akumulátoru z definice akumulovaného náboje *Q*<sub>bat max</sub> a napětí vnitřního napětí akumulátoru *U*<sub>int max</sub>.

$$C_{bat} = \frac{U_{int\,max}}{Q_{bat\,max}} \tag{12}$$

#### 3.4 Vlastnosti bezdrátového přenosu výkonu (systému WPT)

Řízení (a hardware) v této výzkumné zprávě je cíleno na 50kW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice. Aby bylo možné správně navrhnout hardware (výzkumná zpráva 22190-011-2020) a řízení takovéto nabíjecí stanice, je důležité znát chování jádra systému a mít jeho detailní návrh. Jádrem systému je pochopitelně bezdrátový přenos výkonu (systém WPT). Jelikož jsou vazebné elementy řešeny v samostatné výzkumné zprávě, tak je zde uveden jen přehled.

Prototyp systému WPT 50 kW je topologicky řešen s obdélníkovými vazebnými elementy o rozměrech 500 · 750 · 57 mm, v nichž je uložené prostorově distribuovaná vinutí tvaru DD (double D). Součástí vazebných elementů je také magnetický obvod a stínění rozptylového EM pole. Základní geometrie je uvedena na Obr. 5, ze kterého je patrné DD vinutí (měděná barva), feritový magnetický obvod s funkcí stínění magnetického pole (zelená barva) a hliníkové stínění elektrického pole (šedá barva).



Obr. 5 Vazebné elementy systému WPT – základní geometrie

Finální podoba vazebného elementu je uvedena na Obr. 6. V levé části obrázku je zachycen pohled ze zadní strany, na kterém je také vidět kompenzační (rezonanční) kondenzátor. V pravé části obrázku je zachycen pohled z přední strany, kde je skrz plexisklovou krycí desku vidět detailní podoba vinutí.



Obr. 6 Vazebné elementy systému WPT – finální podoba

Pro potřeby regulace bezdrátové nabíjecí stanice jsou důležité obvodové (návrhové) parametry vazebných elementů, které jsou zachyceny v Tab. I. Především se jedná o  $f_0(1)$ ,  $R_L$  (4) a  $U_1(8)$ .

parametry vaz. el. 50 kW	
veličina	velikost
n [/]	2*8
ρ <sub>cu</sub> [mm²]	2*10
L[μH]	119,8
k [/]	0,25
C [nF]	30
f <sub>0</sub> [kHz]	83,952
$U_1 [V_{ef}]$	1000
I <sub>1</sub> [A <sub>ef</sub> ]	57
$U_2 [V_{ef}]$	1000
I <sub>2</sub> [A <sub>ef</sub> ]	53
P [kW]	50
R <sub>L</sub> [Ω]	15,8

Tab. I Návrhové parametry 50kW vazebných elementů

Aby bylo možné navrhované řízení lépe opodstatnit, respektive podložit skutečným chováním přenosu výkonu vazebnými elementy systému WPT, je na Obr. 7,8 a 9 uvedena simulovaná skutečnost 50kW vazebných elementů. Jednotlivé obrázky potvrzují uvedené vstupní poznatky a návrh řízení, tedy předně při  $R_L$  dle (4) ( $R_L$ =15,8  $\Omega$ )):

- $\eta \rightarrow$  maxima (> 96 %)
- $P_1 \rightarrow P_1$  jmenovitý ( $\approx 50$  kW)
- $U_2 \rightarrow U_2 \approx U_1 (1000 \text{ V})$



Obr. 7 simulace 50 kW vazebných elementů – účinností mapa



Obr. 8 simulace 50 kW vazebných elementů – výkonová mapa



Obr. 9 simulace 50 kW vazebných elementů – napěťová mapa (U<sub>2</sub>)

# 4 Návrh řízení

Na základě vstupních poznatků je možné navrhnou několik, více či méně vhodných, způsobů řízení bezdrátové nabíjecí stanice. Dvě finálně uvažované topologie řízení zachycuje Obr. 10. Tento obrázek také zachycuje topologii výkonového obvodu (koresponduje s Obr. 3 a Obr. 4).

Obr. 10 tedy zachycuje dvě varianty topologie výkonové části, kdy je možné uvažovat přímé propojení na místo DCDC měniče (přeškrtnuté), nebo jeho použití (nepřeškrtnuté). Přeškrtnutá varianta je tou nevhodnou (kapitola 4.1, 4.2, 4.3).

Obr. 10 dále zachycuje dvě varianty řízení pro výkonový obvod s DCDC měničem. Nevhodnou (přeškrtnutou) variantou je regulace CCCV baterie pomocí DCDC měniče spolu s regulací velikosti  $U_{DC2}$  pomocí 3LNPU či vstupního střídače (kapitola 4.2). Zcela vhodnou je pak varianta regulace CCCV baterie pomocí 3LNPU a udržování  $R_{L(\eta \rightarrow max)}$  pomocí DCDC měniče (kapitola 4.3).

		topology	regulation strategy	regulated parameter	action variable	
	AC DC	1 phase 3 phase	active passive	Ս <sub>206</sub> <b>CC-CV</b>	Uı	R _
×	DC AC	full H-bridge	square, 50 % square, variable duty cycle	f,	f <sub>1</sub>	
ower flo	M d					
	AC DC	full H-bridge	<del>active</del> passive	<del>cc-cv</del>	U	"cation" """"
		<del>direct conn.</del> 1ph. SD <b>3ph. SD</b>	  shifted control	constant R <sub>eqv</sub>	- 081	Ľ
	1					

Obr. 10 Přehled uvažovaných topologií řízení

#### 4.1 Přímé spojení na místo DCDC

Tato varianta předpokládá veškeré regulační zásahy na primární straně, tedy pomocí 3LNPU nebo vstupního střídače (detailněji ve výzkumné zprávě 22190-018-2017).

Obecně zde není možné ovlivnit velikost  $R_L$  ve smyslu (4).  $R_L$  je v tomto případě shodný s  $R_{bat \ eqv} \ dle$  (11). Na základě (3) bude účinnost nižší než při splnění (4). Při takto neoptimální zátěži navíc dochází ke změně "transformačního poměru" ( $p \neq 1$ ), což vede na prohloubení problematiky následujícího odstavce a k neplatnosti (7).

Primární strana nese veškerou regulační funkci, tedy zajištění CCCV režimu a správné funkce samotného bezdrátového přenosu. Podmínka rezonance dle (1) je zaručena vstupním střídačem (viz kapitola 4.3.3), druhá podmínka týkající se navýšení FOM dle (8) je však z pohledu zátěže (9) nemožná.

Na základě uvedených nepříznivých vlastností přímého spojení na místo DCDC lze očekávat velmi nízkou účinnost takovéto bezdrátové nabíjecí stanice.

I přes značné nevýhody tato varianta vedla na prohloubení znalostí práce samotného bezdrátového přenosu výkonu s regulací pomocí proměnné střídy *U*<sub>1</sub>, tedy s regulací výkonu pomocí vstupního střídače (viz výzkumná zpráva 22190-018-2017).

#### 4.2 CCCV pomocí DCDC

Tato varianta rozděluje řízní mezi primární a sekundární stranu bezdrátové nabíjecí stanice. Nastavení rezonančního kmitočtu systému WPT zajišťuje vstupní střídač, stejně jako v předchozím případě. Vstupní usměrňovač plní funkci zajišťující navýšení FOM, řídí tedy velikost  $U_{2DC}$  (resp  $U_{1DC}$  s uvážením proměnného přenosu systémem WPT  $p=U_{1DC}/U_{2DC}$  vlivem proměnného  $R_L$ ). DCDC měnič pak zajišťuje nabíjení baterie v režimu CCCV (snižující pulzní měnič napětí).

Platí tedy běžné vztahy pro snižující pulzní měnič napětí,

$$U_{bat} = z U_{2DC} \tag{13}$$

$$z = \frac{t_1}{T} = f_{DCDC} t_1,$$
 (14)

kde z představuje poměrné sepnutí spínacího prvku DCDC měniče vůči spínací frekvenci DCDC měniče *f*<sub>DCDC</sub>.

Na základě (13) je možné s pomocí (10) stanovit nabíjecí proud baterie a průběh jejího nabíjení při konstantním  $U_{2DC}$ . Pokud teorii rozšíříme o přepočet odporů, dostaneme rovnici (15), ze které vychází neřiditelnost  $R_L$  a tedy nevhodné řízení z hlediska dosažení maximální účinnosti přenosu.

$$R_L = \frac{R_{bat \, eqv}}{z^2} \tag{15}$$

U této varianty řízení bezdrátové nabíjecí stanice lze očekávat vyšší účinnost nežli v předchozím případě, neboť je zajištěno navýšení FOM. Na druhou stranu je však zátěžný odpor  $R_L$  zcela neřízen ve smyslu (4), což do jisté míry působí kontraproduktivně.

Značnou výhodou tohoto řízení je zajištění CCCV na sekundární straně ihned před baterií, což umožňuje integraci DCDC do bloku baterie a jeho řízení do battery managementu.

#### 4.3 CCCV pomocí 3LNPU

Tato varianta rovněž rozděluje řízení na primární a sekundární stranu bezdrátové nabíjecí stanice, řízení na jednotlivých stranách se však od předchozí varianty značně liší. Shodné je pouze řízení vstupního střídače na  $f_1 = f_{01}$ .

Schéma finální realizace regulace CCCV pomocí 3LNPU je uvedeno v příloze 2. Realizace je pak blíže popsaná v kapitole 5.

#### 4.3.1 DCDC měnič

DCDC měnič zde zastává roli regulátoru zátěžného odporu  $R_L$ . Pomocí nastavení střídy z transformuje nabíjecí odpor baterie  $R_{bat}$  na zátěžný odpor systému WPT ve smyslu (4). To je možné díky (16) a (15). DCDC měnič zde tedy plní funkci pulzního měniče odporu.

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_L} = \frac{(U_2 z)^2}{R_{bat\,eqv}}$$
(16)

Obecně platí, že vnitřní odpor *R<sub>int</sub>* dobré trakční baterie je velmi malý. Po úpravách (10, 11) dostaneme pro ekvivalentní nabíjecí odpor baterie vztah (17), který ukazuje malou závislost jeho velikosti na nabíjecím proudu (popřípadě nabíjecím výkonu). Jeho dosazením do (15) dostáváme finální vztah pro DCDC v této variantě řízení (18).

$$R_{bat \ eqv} = R_i + \frac{U_{int}}{I_{bat}} \tag{17}$$

$$R_L = \frac{R_i + \frac{U_{int}}{I_b}}{z^2} \tag{18}$$

Ze vztahu (18) lze oblast CC nabíjení baterie označit za bezproblémovou, opačně je tomu pak v oblasti CV při velmi malých nabíjecích proudech (resp. výkonech), kdy *R*<sub>bat eqv</sub> začne prudce narůstat. DCDC v tomto režimu umožňuje pouze navyšování odporu, podmínkou správné funkce je tedy (19). Dále je z (11, 15 a 19) možné stanovit minimální nabíjecí proud *I*<sub>bat min</sub> (20) a ekonomický rozsah nabíjecích proudů (21).

$$R_L \ge R_{bat \, eqv}; z \in (0;1) \tag{19}$$

$$I_{bat min} = \frac{U_{bat max}}{R_L}; R_L odpovídá (4)$$
(20)

$$I_{bat} \in \langle I_{bat max}; I_{bat min} \rangle \tag{21}$$

Omezením dle (21) pochopitelně dojde k malému snížení využitelné kapacity baterie. Z hlediska životnosti baterie je tato skutečnost příznivá, omezení je navíc opravdu velmi malé a v případě potřeby je možné provádět zbývající úplné dobití se sníženou účinností odpovídající stavu  $R_L = R_{bat \ eqv}$ .

Využití DCDC měniče jako měniče pro zvyšování odporu zajistí optimální zátěžný odpor (4) systému WPT a tedy maximální možnou přenosovou účinnost. Svou činností pak pochopitelně ovlivňuje celkovou účinnost bezdrátové nabíjecí stanice (22)

$$\eta_{all} = \eta_{3LNPU} \eta_{DCAC} \eta_{trans} \eta_{ACDC} \eta_{DCDC}$$
(22)

kde  $\eta_{3LNPU}$  představuje účinnost síťového usměrňovače,  $\eta_{DCAC}$  účinnost vstupního střídače,  $\eta_{trans}$  účinnost přenosu výkonu,  $\eta_{ACDC}$  účinnost výstupního usměrňovače a  $\eta_{DCDC}$  účinnost DCDC měniče. Účinnost takovéhoto DCDC měniče je s využitím moderních SiC či GaN prvků a při dobrém návrhu pracovní indukčností velmi vysoká, především v oblastech

....

nepřerušovaných výstupních proudů (v našem případě proudů baterií), jak naznačuje Obr. 11. Na tomto obrázku je definován maximální přerušovaný proud jako (23). Pro optimální funkci řízení a zajištění maximální účinnosti pak musí platit (24), kde  $I_{d\partial M}$  představuje maximální zvlnění proudu baterie (výstupu DCDC měniče).

$$I_{d\delta M} = \frac{TU}{8L} \to I_{d\delta M} = \frac{U_{DC2}}{n8L_{DC3}f_{DCDC}}$$
(23)

kde *n* představuje počet fází DCDC měniče a *L*<sub>DC3</sub> výstupní pracovní indukčnost.

$$I_{d\delta M} \ll I_{bat\,min} \tag{24}$$



Obr. 11 Zatěžovací charakteristika snižujícího pulzního měniče [4]

#### 4.3.2 3LNPU

Napěťový pulzní usměrňovač (třífázový) zde zastává roli regulátoru nabíjecího cyklu baterie CCCV a současně roli přípojného místa k distribuční síti.

#### 4.3.2.1 3LNPU – přípojné místo k síti

Mezi základní požadavky na připojení 50kW bezdrátové nabíjecí stanice k síti patří ideálně harmonický odebíraný proud a nulový fázový posuv  $\varphi_{Ux-lx}$ , jak naznačuje Obr. 12. Poté je zajištěn odběr pouze činného výkonu ze sítě při velmi nízkém THD.



Obr. 12 Napěťové a proudové poměry oběru ze sítě – vlevo: využití diodového usměrňovače, vpravo: využití NPU s  $\varphi_{UI}$  =0

Pro 3LNPU platí základní rovnice (25), kde  $U_{xy(1)}$  představuje fázor první harmonické napájecího napětí fáze y,  $I_{y(1)}$  je fázor první harmonické odebíraného proudu ze zdroje fáze y,  $U_{y(1)}$  je fázor napětí za vstupní indukčností 3LNPU fáze y.

$$\frac{\overline{U}_{Ux(1)}}{\overline{U}_{Vx(1)}} = \overline{U}_{U(1)} - j\omega_{3LNPU}L_{AC}\overline{I}_{U(1)} 
\overline{U}_{Vx(1)} = \overline{U}_{V(1)} - j\omega_{3LNPU}L_{AC}\overline{I}_{V(1)} 
\overline{U}_{Wx(1)} = \overline{U}_{W(1)} - j\omega_{3LNPU}L_{AC}\overline{I}_{W(1)}$$
(25)

Pokud například pro fázi *U* sestavíme fázorový diagram (Obr. 13) s předpokladem  $\varphi_{U1-I1} = 0^\circ$ , pak je možné definovat potřebné nastavení úhlu  $\varepsilon$  (26) a poměrného sepnutí  $z_{3LNPU}$  (27) pro dosažení potřebné velikosti  $U_{DC1}$  při  $\varphi_{U1-I1} = 0^\circ$ . Pro odebíraný proud z fáze y pak platí (28).



Obr. 13 Fázorový diagram pro fázu U při  $\varphi_{U-l} = 0$ 

$$\varepsilon = \operatorname{arctg}\left(\frac{\omega L_{AC} I_{y(1)m}}{U_{yx(1)m}}\right)$$
(26)

$$z_{3LNPU} = \frac{U_{DC1}}{\sqrt{3}U_{U(1)m}}$$
(27)

$$I_{y(1)m} = \frac{2U_{DC1}I_{DC1}}{3U_{yx(1)m}}$$
(28)

#### 4.3.2.2 3LNPU – CCCV baterie

Druhým úkolem 3LNPU je zajištění nabíjení baterie v cyklu CCCV. Tento cyklus je realizován na základě nabíjecího výkonu (29), který lze rozdělit do dvou částí

- CC  $\rightarrow$   $I_{bat}$  = kontanta =  $I_{bat max}$
- $CV \rightarrow U_{bat} = konstanta = U_{bat max}$

$$U_{bat}I_{bat} \approx U_{2DC}I_{2DC} \approx U_{1DC}I_{1DC}$$
<sup>(29)</sup>

V režimu CC při zanedbání účinností a využití (7) platí (30)

$$U_{bat} = \frac{1}{I_{bat\,max}} \frac{U_1^2}{R_L} \tag{30}$$

V režimu CV při zanedbání ztrát a využití (7) platí (31)

$$I_{bat} = \frac{1}{U_{bat\,max}} \frac{U_1^2}{R_L} \tag{31}$$

Potřebné napětí prvního DC meziobvodu  $UDC_1$  je nastavováno pomocí 3LNPU dle (32), kde  $z_{3LNPU}$  je nastavováno regulací 3LNPU v dq souřadném systému (viz kapitola 5.2.3).

$$U_{DC1} = \frac{\sqrt{3}U_{U(1)m}}{z_{3LNPU}}$$
(32)

#### 4.3.3 Vstupní střídač

Vstupní střídač je ve všech uvedených variantách řízení totožný, tedy i stejně řízený. Je řízen na obdélníkové výstupní napětí se střídou 50 % o frekvenci  $f_{01}$ . Platí tedy vztah mezi velikostí amplitudy první harmonické  $U_{DC1(1)m}$  a velikostí obdélníkového napětí  $U_{DC1}$  (33).

$$\overline{U_{1(1)m}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \ U_{DC1} \tag{33}$$

Fázor  $U_{1(1)m}$  rotuje s frekvencí  $f_0$ , která je nastavována analogově-digitálním fázovým závěsem (34) (viz kapitola 5.1). Pomocí velikosti  $f_0$  je tedy udržován plný rezonanční stav vazebných elementů, kdy fáze napětí  $\varphi_{U1}$  a proudu  $\varphi_{11}$  je totožná, nulová. Pro ideální případ pak platí (1). Tato frekvence se však v reálném provozu mění kvůli změnám polohy vazebných elementů, prostředí aj., tedy kvůli změnám M (2).

$$\varphi_{U1} = \varphi_{I1} = 0 \tag{34}$$

# 5 Realizace řízení

Popisované řízení a jeho simulace jsou určeny pro 50kW prototyp systému WPT. Řízení bylo pro účely ověření implementováno na 5KW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice.

### 5.1 Vstupní střídač

Realizované řízení vstupního střídače je schematicky uvedeno na Obr. 14. Vstupní střídač (DCAC) je výkonově řešen jako jednofázový H-můstek (viz příloha 1 – výkonová topologie). Výstupní napětí  $U_1$  má fixní střídu 50 %, výstupní kmitočet  $f_{sw}$  je nastavován na aktuální rezonanční kmitočet vazebných elementů systému WPT  $f_0$  pomocí analogově-digitálního fázového závěsu (DAPLL).



Obr. 14 Realizace řízení vstupního střídače

V sekci "a" Obr. 14 je uvedena digitální část realizovaného DAPLL. V případě dodávaného (přenášeného) výkonu menšího minimálnímu nastavenému (10ky Wattů) je  $f_0$  nastaveno na vypočtený kmitočet dle (1). Tím je zaručen rozběh systému WPT z nulového výkonu. V případě  $P_1 > P_{1min}$  je  $f_0$  nastavován (upravován) pomocí PI regulátoru fáze  $\varphi_{U1/1}$ .

Vstupem PI regulátoru  $\varphi_{U1/1}$  je požadovaná hodnota fázového posuvu (0°) a skutečná hodnota fázového posuvu měřená analogovou částí DAPLL (červený blok z Obr. 14. Detail tohoto bloku je uveden na Obr. 13.



Obr. 15 Analogová část DAPLL (Simulink) – nahoře: logický část, dole: výstupní filtr

Funkce analogové části DAPLL je v principu jednoduchá. Pomocí precizního snímače proudu (na bázi Hallova jevu) je snímán proud  $I_1$ , který je následně tvarován komparátorem (36). Z PWM generátoru je přes GPIO vyveden PWM EVENT flag (PWM BOT). Tyto dva signály jsou zpracovávány pomocí DQ klopného obvodu, který generuje poměrné sepnutí signálu *top* ( $\varphi_{U1I1} > 0$ ) nebo *bot* ( $\varphi_{U1I1} < 0$ ). Tato poměrná sepnutí jsou zpracována filtrem na napětí o 0 až 5 V, kde pro  $\varphi_{U1I1} = 0$  připadá 2,5 V. 2,5 V je tedy v realizované regulaci také požadovaná hodnota pro PI regulátor. Výstup analogové části DAPLL je pomocí AD převodníku zaveden do DSP, kde je dále zpracováván ve smyslu Obr. 14.

$$y = 1 \leftrightarrow l_1 > 0$$
  

$$y = 0 \leftrightarrow l_1 < 0$$
(36)

Hlavním důvodem realizace DAPLL je především šetření výpočetního výkonu DSP. Pro předpokládaný kmitočet  $f_0$  = 85 kHz a přesné nastavení  $\varphi_{U1I1}$  = 0 by bylo nutné vzorkovat ADC

s minimálně 850 kHz a průběh poté dopočítávat, nebo vzorkovat klopný obvod pomocí GPIO s ještě větší frekvencí. Následně přesně počítat časovou diferenci mezi nimi atd. Uvedená realizace DAPLL toto zcela vylučuje a zajišťuje maximální možnou přesnost regulace  $\varphi_{U1I1}$ .

### 5.1.1 Vstupní střídač – simulace

Simulace vstupního střídače je sestavena v prostředí Matlab – Simulink. Aby měla tato simulace vypovídající schopnost, musí pracovat s modelem vazebných elementů. Její hlavní část zachycuje Obr. 16 vpravo ( $R_3$  nahrazuje ekvivalentní zátěžný odpor  $R_l$ ). Obr. 16 vlevo zachycuje výkonový obvod vstupního střídače (dva paralelní prvky). Napájení vstupního střídače zajišťuje řízený zdroj. Součástí modelu z Obr. 16 jsou také tepelné simulace, které zde není na místě rozebírat (viz výzkumná zpráva 22190-011-2020).



Obr. 16 Silová část simulace vstupního střídače.

Další částí této simulace je zmíněný DAPLL (Obr. 17 dole), jež byla popsána v kapitole 5.1.

Dalšími částmi simulace je digitální část, tedy zmiňovaný PI regulátor (Obr. 17 zcela vlevo). Následující blok tvoří emulátor hardware, tedy PWM periférie DSP, driverů atd. Zcela vpravo na Obr. 17 je část pro vykreslení výpočtů a dopočet zmíněných tepelných simulací.



Obr. 17 Simulace vstupního střídače – Přehled

Hlavní výsledky simulace zachycují Obr. 18, 19 a 20. Na prvním zmiňovaném je zachycen průběh skutečného  $\varphi_{U1/1}$  [V], tedy výstup analogové části DAPLL. Po spuštění je patrný rozdíl oproti vypočtené a skutečné  $f_0$  a následné doregulování na  $\varphi_{U1/1} = 0^\circ$  (2,5 V). Tomuto pak odpovídají i průběhy primárních ( $U_1$ ,  $I_1$ ) a sekundárních ( $U_2$ ,  $I_2$ ) veličin vazebných elementů systému WPT (Obr. 19). Poslední obrázek (Obr. 20) zachycuje detail začátku a konce simulace z Obr. 17. Zde je zřejmá správná regulace, neboť na začátku simulace dochází k hrubému zavěšení s následným doregulováním na  $\varphi_{U1/1} = 0^\circ$  a na konci simulace je stále  $\varphi_{U1/1} = 0^\circ$ .



Obr. 18 Simulace DCAC – průběh regulace  $\varphi_{U111}$ , dle předchozího popisu



Obr. 19 Simulace DCAC – průběh U a I na vazebných elementech



Obr. 20 Simulace DCAC – průběh U a I na vazebných elementech - detail

#### 5.2 3LNPU

Realizované řízení vstupního střídače je schematicky uvedeno na Obr. 21 (výňatek z přílohy 2). Výkonová topologie 3LNPU (*ACDC*) je zcela běžná, bez jakýchkoli úprav. Zdrojem je distribuční síť 3\*400 V. Síť 3\*600 V je v současné době pouze uvažována jako možná.



Obr. 21 Realizace řízení 3LNPU.

Základní řízení napěťového pulzního usměrňovače je řešeno v dq souřadném systému, do nějž jsou převáděny střídavé veličiny (sektor 4, Obr. 21). V základním řízení 3LNPU (sektor 3, Obr. 21) jsou odděleně regulovány d a q složky fázových proudů ( $I_{yd}$ ,  $I_{yq}$ ). Pro  $\varphi_{U1I1} = 0^{\circ}$  je požadovaná hodnota  $I_{ydW} = 0$ . Požadavek na  $I_{yqW}$  pak vychází z napěťového regulátoru  $U_{DC1}$ (sektor 2, Obr. 21). Tomuto regulátoru je předřazena ochrana zdroje režimem "Over Current - hold Constant Voltage" (OC-CV). Změny požadavku  $U_{DC1W}$  jsou také podrobeny pomalým změnám pomocí rampy.

Zmiňovaná regulace nabíjení akumulátoru v režimu CCCV pomocí 3LNPU je realizována pomocí regulační struktury uvedené v sektoru 1, Obr. 19. Z důvodu robustnosti a univerzality bezdrátové nabíjecí stanice je hlavní regulovanou veličinou nabíjecí výkon (dle odstavce 4.3.2.2.) *P*<sub>bat</sub>, který je omezen na minimální (přenositelný systémem WPT) a maximální (nabíjecí baterie) výkon. Výstupem regulátoru nabíjecího výkonu je požadované napětí *U*<sub>DC1W</sub> dle odstavce 4.3.2.2. Požadovaný nabíjecí výkon *P*<sub>batW</sub> je možné zadávat přímo, nebo častěji

skrze regulaci CCCV. Regulace CCCV je složena ze dvou kaskádních regulátorů, tedy regulace napětí baterie ( $U_{bat}$ ) a proudu baterie ( $I_{bat}$ ). Režim CV zajišťuje regulátor  $U_{bat}$  ve spojení s omezovačem  $U_{batW}$ . Režim CC zajišťuje nadřazený regulátor  $I_{bat}$  s využitím regulátoru  $U_{bat}$ . Požadovaný nabíjecí proud  $I_{batW}$  je také omezen na svou maximální hodnotu  $I_{batW}$  max.

Regulované veličiny *U*<sub>bat</sub>, I<sub>bat</sub> a *P*<sub>bat</sub> jsou na primární stranu bezdrátové nabíjecí stanice komunikovány bezdrátovou CAN sběrnicí ze sekundární strany.

Jak je nyní více zřejmé, regulace CCCV pomocí 3LNPU skrývá benefit také v přístupu uživatele, respektive hierarchii regulace. Veškeré regulační zásahy se v tomto případě řeší pomocí primární strany bezdrátové nabíjecí stanice ( $\mu$ C1). Sekundární strana ( $\mu$ C2) poté zajišťuje pouze komunikaci, regulaci  $R_L$  na konstantu a měření. Součástí  $\mu$ C2 a  $\mu$ C1 jsou pochopitelně ochrany, jenž jsou vzájemně komunikované (viz kapitola 5.4).

#### 5.2.1 3LNPU simulace

Simulace výkonové části 3LNPU je realizována v prostředí Matlab-Simulink. Simulace 3LNPU je řešena odděleně, kdy zbývající část bezdrátové nabíjecí stanice je nahrazena adekvátní zátěží (Obr. 22). Zdrojem pro 3LNPU je distribuční síť 3\*400 V. Vstup 3LNPU je osazen měničovými indukčnostmi. Z důvodu velkých proudů a použitých součástek jsou spínací polovodičové prvky řazeny paralelně po třech. Spodní část Obr. 22 zachycuje tepelné výpočty. Návrh silového obvodu a tepelných výpočtů nejsou předmětem této zprávy (viz výzkumná zpráva 22190-011-2020)



Obr. 22 Simulace 3LNPU – výkonová část

Přehled realizovaného řízení je uveden na Obr. 23. V pravé části je patrná výkonová část a dopočty tepelných simulací. V levé části jsou uvedeny vstupy (konstanty) a blok emulátoru software. Uprostřed je poté blok emulátoru hardware. Emulátor software je topologicky shodný s Obr. 21. Emulátor hardware simuluje PWM periferie DSP a drivery, obdobně jako v předchozí části simulace (kapitola 5.1.1.)



Obr. 23 3LNPU – přehled řízení

Hlavní výsledky simulace zachycují Obr. 24 a Obr. 25. Na Obr. 24 jsou zachyceny napětí a odebírané proudy z distribuční sítě 3\*400 V. Simulace zde zcela opodstatňuje teoretický popis (kapitola 4.3.2.1) a použití 3LNPU v bezdrátové nabíjecí stanici. Odebíraný proud  $I_y$  je prakticky sinusový o první harmonické a ve fázi s napětím  $U_y$ . Obr. 25 zachycuje napěťové a proudové poměry na výstupu 3LNPU (respektive na vstupu vstupního střídače - DCAC). Je zde patrná kvalitní regulace  $U_{DC1}$  a odebíraný proud  $I_{DC1}$  simulovaným odběrem vstupního střídače DCAC.



Obr. 24 Simulace 3LNPU – odebírané U a I z distribuční sítě



Obr. 25 Simulace 3LNPU – U<sub>DC1</sub> a I<sub>DC1</sub>

#### 5.3 Sekundární část

Realizované řízení sekundární strany je schematicky uvedeno na Obr. 26 (výňatek z přílohy 2). Součástí sekundární strany je výstupní usměrňovač (ACDC), DCDC měnič (DCDC) a baterie. Návrh výkonových částí není součástí této zprávy (viz výzkumná zpráva 22190-011-2020). Topologicky je ACDC řešen jako jednofázový můstkový diodový usměrňovač a DCDC jako vícefázový snižující pulzní měnič s přesazeným řízením bez mezifázových transformátorů (MFT). Baterie je uvažována Li-ION s vlastním baterry managementem a CAN komunikací.

Řízení sekundární části je řešeno v  $\mu C2$  (DSP 2). Jak je z obr. 24 zřejmé, jde o řízení DCDC měniče jako zvyšujícího měniče odporu pro dosažení  $R_L$  ( $R_{ekv}$   $_W$ ) ve smyslu předchozího popisu (především kapitola 3 a 4.3.1).

Vzhledem k povaze akumulátoru coby tvrdého napěťového zdroje je možné  $U_{DC2}$  považovat téměř za shodné s  $U_{DC3}$  a k regulaci  $R_L$  přistoupit přes nabíjecí proud  $I_{DC3}$ . Regulátorem  $I_{DC3}$  je nastavována střída DCDC, ta je omezena na minimální (0.1) a maximální (0.9) hodnoty za účelem vyloučit chod systému bez zátěže a bez vlivu DCDC. Požadovaný proud  $I_{DC3 \ W}$  je dán regulátorem ekvivalentního zátěžného odporu systému WPT  $R_{eqv}$  ( $R_L$ ). Skutečná hodnota  $R_{eqv}$  je dopočítávána z hodnot  $U_{DC2}$  a  $I_{DC2}$ , požadovaná hodnota  $R_{eqv \ W}$  je zadávána jako konstanta dle (4). Na místě je pochopitelně omezovač a rampa  $R_{eqv \ W}$  a proudu baterie  $I_{DC3 \ W}$ .

Z principu uvedené regulace je zřejmé jisté omezení na minimální nabíjecí proud, pod kterým není možné zaručit optimální nastavení  $R_L$  dle (4), jak bylo ostatně vzpomenuto dříve (20).

Obr. 26 zachycuje návrh s dvoufázovým DCDC s přesazeným řízením, odtud nastavení  $\varphi_{a}$ ,  $\varphi_{b}$  a výpočet  $I_{DC3}$ .

Řízení také využívá měření a stavových bytů battery menagementu pro zajištění správného a především bezpečného měření (viz kapitola 5.4).



Obr. 26 Realizace řízení sekundární strany

#### 5.3.1 Sekundární část - simulace

Simulace sekundární části (Obr. 27) je založena na dvou výkonových obvodech. Ve spodní části Obr. 27 je vložena zjednodušená vstupní část systému WPT a samotný výkonový přenos (Obr. 28). Zjednodušení spočívá především ve vynechání regulace a její nahrazení konstantním nastavením spínání DCAC. Druhým výkonovým blokem je samotná sekundární část (Obr. 29). Ta je složena ze zmíněného jednofázového diodového můstkového usměrňovače s patřičnými filtry a z dvoufázového snižujícího DCDC měniče bez MFT. Poslední část na Obr. 29 tvoří náhrada bateriové zátěže a tepelné výpočty. Simulace baterie a tepelné výpočty nejsou součástí této zprávy.

Samotnou regulaci na Obr. 27 zachycuje blok zcela vlevo (software emulator), který topologicky koresponduje s Obr. 26. Poslední zbývající blok je hardware emulator, obdobně jako v předchozích kapitolách. Součástí simulace jsou také tepelné výpočty.







Obr. 29 Simulace sekundární části – výkonový obvod

Hlavní výsledky simulace zachycují Obr. 30 a 31. Obr. 30 zachycuje průběh regulace  $R_{eqv}$  a s ní korespondující proud  $I_{DC2}$ . Simulace je tvořena pro 50kW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice, která pracuje s  $R_L$  = 15.8  $\Omega$  (dle 4) Obr. 31 zachycuje napěťové a proudové poměry na baterii.



Obr. 30 Simulace sekundární části – DC2



Obr. 31 Simulace sekundární části – DC3

# 5.4 Softwarové ochrany a komunikace

Implementace softwarových ochran je prakticky libovolná. V testovaném algoritmu řízení bezdrátové nabíjecí stanice byly implementovány tyto základní ochrany:

- 3LNPU nadproud  $\rightarrow$  OC-CV
- DC1 přepětí a nadproud  $\rightarrow$  odstavení
- DC2 přepětí a nadproud→ odstavení
- DC3 přepětí a nadproud  $\rightarrow$  odstavení
- Přehřátí baterie → odstavení
- Vyhodnocení chyby battery managementem  $\rightarrow$  odstavení

Součástí složitého systému bývají bezpečnostní pojistky správného zapínání, vypínání a funkce. V bezdrátové nabíjecí stanici je třeba řešit tyto základní:

- Odpojená baterie → odstavení
- Vypnutý nebo nedetekovaný sekundár → odstavení
- Chyba komunikace, ztráta sekundáru  $\rightarrow$  odstavení
- Zapnutí primáru pouze při správné komunikaci se sekundárem a v bezchybovém stavu celého systému.

Správná CAN komunikace mezi primárem a sekundárem je tedy velmi důležitá nejen pro regulaci, ale také pro sowtvarové ochrany. Veškeré chybové stavy jsou sdružovány do "bytů" a komuhnikovány na primární stranu a naopak. Díky tomu je krom ochran velmi snadné také připojení diagnostiky či uživatelského interface.

Obdobným způsobem jako chyby jsou komunikovány i měřené a dopočítávané veličiny. Tyto jsou však komunikovány výhradně ze sekundáru na primár, neboť obráceně by byla komunikace prakticky bezvýznamná. Toto opět souvisí se snadnou diagnostikou a připojením uživatelského interface (pochopitelně předně s řízením). Komunikované veličiny jsou:

- U<sub>bat</sub>
- I<sub>bat</sub>
- T<sub>bat1, 2 a 3</sub>
- U<sub>2</sub>
- |<sub>2</sub>
- R<sub>eqv</sub>
- P<sub>2</sub>
- P<sub>bat</sub>

Rychlost implementované komunikační sběrnice je 500 kbps. CAN sběrnice je řešena jako troj-vodičova (H, L, GND) se stíněným kabelem. Bezdrátová část komunikace je u 5kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice nahrazena drátovou.

Celkem je na primární straně obsluhováno 6 CAN mailboxů + 2 diagnostické a na sekundární straně 6 mailboxů + 2 s baterií. Komunikaci mezi primárem a sekundářem řeší CAN sběrnice CANA a komunikaci s baterií či diagnostikou sběrnice CANB DSP TMSF28335.

# 6 Experimentální ověření funkce

Experimentální ověření funkce slouží pro ověření správného návrhu regulace a jejího doladění.

Uvedené teoretické poznatky (kapitola 3 a 4), které byly použity pro sestavení simulace (kapitola 5) a parametry získané při simulacích bezdrátové nabíjecí stanice, byly implementovány na reálný systém bezdrátové nabíjecí stanice.

Topologicky je bezdrátová nabíjecí stanice o výkonu 5 kW i 50 kW stejná a lze tak na obě varianty aplikovat stejné řízení. Pouze nastavení regulátorů a rozsahy měření lze očekávat rozdílné.

Podobnost obou výkonových variant tedy umožňuje ověření navrženého řízení pro 50 kW bezdrátovou nabíjecí stanici na 5 kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice.

### 6.1 Měřící stanoviště

Měřící stanoviště 5kW bezdrátové nabíjecí stanice je topologicky naznačeno na Obr. 32. Fotografie stanoviště je pak uvedena na Obr. 33. V horní části Obr. 32 je uveden výkonový řetězec bezdrátové nabíjecí stanice, tedy:

- Distribuční síť 3\*400 V
- 3LNPU simulátor (založen na CSW5550)
- Vstupní střídač (DCAC)
- Samotný bezdrátový přenos výkonu se systémem FOD (WPT + FOD)
- Výstupní usměrňovač (ACDC)
- Snižující DCDC měnič v režimu měniče odporu (DCDC)
- Nabíjený akumulátor (battery)

Prostřední část Obr. 32 zachybuje řádící strukturu na úrovni hardwarové vrstvy, tedy:

- Primární a sekundární řídící interface s DSP TMS F28335
- Digitálně-analogový fázový závěs  $U_1, I_1$  (DAPLL viz kapitola 5)
- Řídící jednotku baterie (battery management)
- Uživatelský interface (náznakově v podobě tabletu)
- Komunikační (CAN), signálové (PWM) a měřící (pro ADC) propojení

Spodní část Obr. 32 zachycuje precizní výkonový analyzátor ZES Zimmer LMG 500, který provádí sběr DC hodnot bezdrátové nabíjecí stanice, ze kterých je dále usuzováno na účinnosti, přesnosti regulace atd. (jinými slovy slouží pro získání přesných, prezentovatelných a vypovídajících hodnot). Zaznamenávána jsou data:

- Napětí, proud a výkon DC1 (U<sub>DC1</sub>, I<sub>DC1</sub>)
- Napětí a proud DC2 (U<sub>DC2</sub>, I<sub>DC2</sub>)
- Napětí a proud DC3 (*U*<sub>DC3</sub>, *I*<sub>DC3</sub>)

Součástí měřícího stanoviště je také přímý odečet dat z řízení (z DSP) pomocí CAN2 (PC na místo uživatelského interface z Obr. 32). Předně jsou odečítána data:

- *R*<sub>L</sub> dle údajů řízení
- *U*<sub>bat</sub> dle údajů battery managementu
- $\eta_{trans}$  přenosová dle údajů řízení
- $\eta_{all}$  celková dle údajů řízení

### Poznámky:

Simulátorem 3LNPU je rozuměn laboratorní zdroj Ametek CSW 5550 používající své analogové vstupy pro nastavení výstupního napětí. V DSP primární strany tedy běží regulační smyčka dle Obr. 21, jejíž výstupy (otevření jednotlivých fází) jsou přepočteny na požadované napětí, které CSW 5550 nastaví na svých výstupech (U<sub>DC1</sub>).

Bezdrátový přenos výkonu, respektive jeho vazebné elementy jsou vybaveny systémem na detekci cizích předmětů a živočichů v aktivní zóně (prostoru mezi elementy), který je označen jako FOD. Tento systém a jeho funkce není předmětem této výzkumní zprávy.



Obr. 32 Topologie měřícího stanoviště

Fotografie na Obr. 33 zachycuje reálné měřící stanoviště 5kW bezdrátové nabíjecí stanice. Oproti Obr. 32 jsou zde navíc dva osciloskopy (pro odečet oscilografů), dva laboratorní zdroje (pro napájení elektroniky a ventilátorů) a elektronická zátěž (pro vybíjení akumulátoru).



Obr. 33 Měřící stanoviště

Jedním z hlavních ukazatelů pro systém bezdrátové nabíjecí stanice je účinnost (39), respektive účinnost bezdrátového přenosu výkonu (37) a celková účinnost bezdrátové nabíjecí stanice (38). Obě tyto účinnosti jsou měřeny v režimu DC to DC (tedy ze stejnosměrných hodnot). Na uvedené účinnosti je při ověřování správnosti navržených řízení brán velký důraz. Na základě (37-39) jsou porovnávány různé druhy navržených regulací. Výsledy těchto porovnání jsou uvedeny v kapitole 6.3.

$$\eta_{trans} = \frac{P_{DC2}}{P_{DC1}} \tag{37}$$

$$\eta_{all} = \frac{P_{DC3}}{P_{DC2}} \tag{38}$$

$$\eta_{all} = \eta_{trans} \cdot \eta_{DCDC} \tag{39}$$

Nabíjený akumulátor byl sestaven speciálně pro účely testování na 5kW bezdrátové nabíjecí stanici při sníženém výkonu (cca 1 kW) firmou Bech Akku Power. Parametry tohoto akumulátoru jsou uvedeny v Tab. II.

parametr	hodnota
jmenovité napětí	108 V
Jmenovitá kapacita	11,6 Ah (1078 Wh)
Minimální napětí	93 V
Maximální napětí	125 V
Maximální trvalý nabíjecí proud	10 A
Maximální trvalý vybíjecí proud	40 A

Tab. II Parametry nabíjeného akumulátoru

#### 6.2 Výsledky měření

Tato kapitola se zaměřuje na prezentaci výsledků z měření při regulaci CCCV pomocí 3LNPU spolu s DCDC regulující *R*<sub>L</sub>, což je, dle dosavadního výzkumu nejlepší možnost řízení bezdrátové nabíjecí stanice. V první části kapitoly jsou prezentovány záznamy obvodových veličin z nabíjení akumulátoru (Tab. II). V druhé části jsou uvedeny oscilografy z vybraných časových bodů nabíjení.

#### 6.2.1 Záznam nabíjení baterie

Ústřední obrázek prezentace výsledků tvoří Obr. 34, který v horní části zachycuje průběh výkonů ( $P_{DC1}$ ,  $P_{DC2}$  a  $P_{DC3}=P_{bat}$ ), dále účinnosti  $\eta_{trans}$  a  $\eta_{all}$  dle (37-38). Dolní část Obr. 34 je věnována nabíjené baterii. Je zde zachycen nabíjecí proud ( $I_{DC3}=I_{bat}$ ) a napětí na akumulátoru ( $U_{DC3} - z$  LMG 500 a  $U_{bat} - z$  battery managementu).

Obr. 34 vypovídá o kvalitní regulaci v režimu CCCV (vlevo dole) a o nabíjení baterie v celém rozsahu provozních napětí (Tab. II) (vpravo dole). Z pohledu baterie je tedy systém výborný.

V pravé horní části Obr. 5 je zachycen průběh účinností, které jsou vyšší 90 % ( $\eta_{all} \approx 90\%$ ,  $\eta_{trans} \approx 96\%$ ). Tyto dosažené účinnosti jsou naprosto výborné. Je však třeba ještě uvážit důvod relativně nízké účinnosti DCDC měniče ( $\eta_{DCDC} \approx 93,7\%$ ). DCDC měnič byl pro tyto účely pouze složen z již existujících komponent. Byl použit SiC měnič pro elektromotokáru druhé generace a laboratorní pasivní prvky z inventáře EC201. Především indukčnosti DCDC měniče pak snižují jeho účinnost, neboť jsou zbytečně velké a především jsou navrhované na mnohem menší kmitočty. Při požití speciálně navrženého DCDC měniče lze předpokládat navýšení  $\eta_{DCDC}$  o dvě až čtyři procenta.

Levá horní část Obr. 34 je věnována zmíněným výkonům v bezdrátové nabíjecí stanici. Jejich průběh odpovídá předpokládanému průběhu při nabíjení akumulátoru v režimu CCCV.



Obr. 34 Výsledky měření – hlavní přehled

Obr. 35 v horní části zachycuje detail průběhu účinností z Obr 34. Ve spodní části Obr. 35 je uveden průběh ekvivalentního nabíjecího odporu baterie  $R_{bat \ ekv}$  dle (11) a ekvivalentního zátěžného odporu systému WPT  $R_{ekv} = R_L$  dle (4). Zde je patrná správná funkce DCDC měniče až do úplného nabití baterie ( $R_{Lw} = 100 \ \Omega$  pro 5kW prototyp). Úplné nabití akumulátoru nastává pro *time*  $\geq$  14290 s. Při dalším chodu nabíjecí stanice je  $I_{bat} < I_{bat \ min} = 1,25$  A dle (20) a dochází k úplnému otevření DCDC měniče. V režimu CV (time  $\geq$  9625 s) je patrný malý nárůst regulační odchylky, který je způsoben ADD.



Obr. 35 Výsledky měření – ekvivalentní odpory a účinnosti

Následující Obr. 36, 37 slouží pro doplnění představy o chování bezdrátové nabíjecí stanice při řízení CCCV pomocí 3LNPU. Obr. 36 zachycuje společně jednotlivé obvodové veličiny (U, I, P). Obr. 37 tyto veličiny pak zachycuje zcela odděleně.







Obr. 37 Výsledky měření – vedlejší přehled

### 6.2.2 Oscilografy z nabíjení baterie

Následujících několik obrázků zachycuje oscilografy z vybraných časů nabíjení akumulátoru (Tab. III). Snahou je zachytit krajní situace, tedy začátek nabíjení, přechod mezi režimem CC a CV a konec nabíjení, tedy přechod mezi režimem CV a úplným otevřením DCDC měniče. Jednotlivé oscilografy plně podporují správnost řízení bezdrátové nabíjecí stanice řízením CCCV pomocí 3LNPU a správné nabíjení akumulátoru.

Tab. III Popis oscilografů			
Obr.	popis		
36	Začátek nabíjení – $U_{bat}$ = 93 $\rightarrow$ 104 V, $I_{bat}$ = 10 A, režim CC, time $\approx$ 0 s		
37	Blížící se konec režimu CC – $U_{bat}$ = 124 V, $I_{bat}$ = 10 A režim CC, time $\approx$ 9625 s		
38	Začátek režimu CV – $U_{bat}$ = 125 V, $I_{bat} \approx$ 9,5 A režim CV, time $\approx$ 9700 s		
39	Blížící se konec režimu CV – $U_{bat}$ = 125 V, $I_{bat}$ = 2 A, time $\approx$ 12920 s		
40	Konec nabíjení – $U_{bat}$ = 125 V, $I_{bat} \approx$ 1A, time $\approx$ 14570 s		

Legenda k jednotlivým oscilografům je uvedena na každém obrázku. Pro přehlednost ji také zachycuje Tab. IV, která též popisuje význam jednotlivých oscilografů v Obr.

poloha oscilografu v Obr.	popis oscilografu	Barva průběhu	význam
	poměry na baterii - makro	modrá	$U_bat$
vlevo nahoře		červená	U <sub>L DCDC</sub> měniče
		zelená	l <sub>bat</sub>
	poměry na baterii - detail	modrá	$U_bat$
vpravo nahoře		červená	U <sub>L DCDC</sub> měniče
		zelená	I <sub>bat</sub>
	poměry na vazebných elementech	světle modrá	I <sub>1</sub>
dole		tmavě modrá	$U_1$
		červená	U <sub>2</sub>

Tab.	IV Legenda	oscilografů
------	------------	-------------

Mezi důležité postřehy z oscilografů patří:

- Z průběhů na vazebných elementech je vidět kvalitní nastavení f<sub>0</sub> pomocí DAPLL.
- Z průběhů na vazebných elementech je vidět regulace CCCV pomocí 3LNPU
- Z průběhů na baterii je patrná správná funkce DCDC měniče a změny střídy DCDC měniče.
- Z Obr. 42, průběhy na baterii je vidět omezení na maximální střídu. Úplné otevření DCDC měniče je tedy zakázáno (V podstatě jen bezpečnostních důvodů).





Obr. 39 režim CC,  $U_{bat}$  = 124 V



Obr. 41 režim CV,  $I_{bat} \approx 2 \text{ A}$ 



#### Obr. 42 Konec nabíjení, Ibat $\approx$ 1 A

#### 6.3 Porovnání navržených možností řízení z kapitoly 4

U každé z variant řízení z kapitoly 4 bylo provedeno základní měření, při kterých byla vyhodnocována vhodnost daného způsobu řízení bezdrátové nabíjecí stanice. Sledované aspekty byla účinnost a řiditelnost.

Varianta řízení CCCV pomocí DCDC vykazuje velmi malou účinnost a nízkou až žádnou řiditelnost. Napětí  $U_2$  je nastavováno dle akumulátoru, tedy na jeho maximální napětí + rezerva. Řízení CCCV pomocí snižujícího DCDC měniče napětí vede na neřiditelnou ekvivalentní zátěž vazebných elementů, což veden na výkonovou nestabilitu dle kapitoly 3.4, Obr. 8.

Varianta řízení CCCV pomocí 3LNPU spolu s přímím spojením na místě DCDC měniče vykazuje lepší účinnost (avšak stále nedostatečnou) a dobrou řiditelnost. Zátěžný odpor vazebných elementů je dán nevhodným a měnícím se ekvivalentním nabíjecím odporem baterie a CCCV cyklus je řízen skrze napětí  $U_2$  pomocí 3LNPU.

Varianta řízení CCCV pomocí 3LNPU spolu s DCDC s řízením na ekvivalentní zátěžný odpor vylepšuje předchozí variantu o definované, optimální zatížení vazebných elementů, díky čemuž je dosahováno vysoké účinnosti.

Uvedené vlastnosti shrnuje a potvrzuje Tab. V, která zachycuje dosažené účinnosti jednotlivých variant řízení. Vhodnost CCCV pomocí 3LNPU ve spojení s DCDC měničem s regulací na optimální ekvivalentní zátěž je nesporná.

konfigurace				
síťový usměrňovač	DC/DC měnič	η <sub>transfer</sub> [%]	η <sub>⊳с⊳с</sub> [%]	η₌⊫ [%]
U <sub>2</sub>	CC-CV	90,19	86,37	77,9
CC-CV	přímé spojení	82,06	99,5	81,6
CC-CV	<b>R</b> <sub>ekv</sub>	95,36	96,63	92,09

Tab. V Dosažené účinnosti jednotlivých variant řízení

### 7 Závěr

Vhodným návrhem řízení a výkonové topologie bezdrátové nabíjecí stanice je možné dosáhnout velmi kvalitních parametrů, které jsou srovnatelné s klasickými kabelovými nabíjecími stanicemi. Hlavním ukazatelem dobré bezdrátové nabíjecí stanice je její účinnost a kvalita nabíjení akumulátoru.

Navrhovaná strategie řízení "CCCV pomocí 3LNPU spolu s DCDC s regulací na optimální ekvivalentní zátěžný odpor" dosahuje vynikajících parametrů v podobě trvalé přenosové účinnosti (po celou dobu nabíjení) větší než 96 % a trvalé celkové účinnosti větší než 90 %. Současně je v práci vzpomenuto používání součástí pro systém neurčených, je zde tedy reálný předpoklad dosažitelné účinnosti o dvě až čtyři procenta vyšší.

Navrhovaná strategie řízení "CCCV pomocí 3LNPU spolu s DCDC s regulací na optimální ekvivalentní zátěžný odpor" dosahuje vynikající kvality nabíjení akumulátoru v režimu CCCV od minimálního až po maximální napětí na akumulátoru s maximálním zvlněním nabíjecího proudu 0,1 A.

Navrhovaná strategie řízení "CCCV pomocí 3LNPU spolu s DCDC s regulací na optimální ekvivalentní zátěžný odpor" zajišťuje automatické nastavení pracovního kmitočtu vstupního střídače pro dosažení úplného rezonančního stavu vazebných elementů při měnících se podmínkách činitele vazby. Současně tato regulace pracuje zcela automaticky a umožňuje nabíjení akumulátoru bez nutnosti zásahu obsluhy.

Při srovnání dle Tab. V jsou patrné bezkonkurenční dosahované účinnosti zvolené regulace ve srovnání s regulacemi dříve uvažovanými.

Samozřejmostí moderní bezdrátové nabíjecí stanice je kompatibilita s osobní elektronikou v roli uživatelského interface a kompatibilita s infotainmentem elektromobilu, Což po úpravách aplikační vrstvy komunikace implementace řízení umožňuje.

Implementace řízení byla provedena na 5kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice. Topologicky je však řízení a hardware shodný s 50kW bezdrátovou nabíjecí stanicí a proto lze ověření laboratorním měřením na 5kW prototypu (jak bylo provedeno) považovat za obecně platné.

Řízení bylo implementováno do dvou DSP TMSF28335 ve smyslu přílohy 2, čímž je možné řídit topologie bezdrátové nabíjecí stanice ve smyslu přílohy 1 (a jí příbuzných) strategií řízení "CCCV pomocí 3LNPU spolu s DCDC s regulací na optimální ekvivalentní zátěžný odpor". Zdrojový kód pro DSP není součástí této výzkumné zprávy.

# Literatura

- [1] P. Goran, Nabíjecí stanice pro elektrická vozidla, bakalářská práce, ZČU/FEL/KEV, 2018
- F. Vondrášek, Výkonová elektronika, svazek I, ZČU v Plzni/FEL/ KEV, ISBN: 80-7082-136-1, 1994
- F. Vondrášek, Výkonová elektronika, svazek II, ZČU v Plzni /FEL/KEV, ISBN: 80-7082-137-X, 1994
- [4] F. Vondrášek, Výkonová elektronika, svazek III, ZČU v Plzni/FEL/KEV, ISBN: 80-7082-485-9, 1998
- [5] F. Tůma, Automatické řízení 1, ZČU v Plzni, ISBN: 80-7082-953-2, 20003

# Seznam obrázků

Obr. 1 Topologie kabelových dobíjecích stanic [1]	5
Obr. 2 Topologie bezdrátové dobíjecí stanice	6
Obr. 3 Výkonová topologie bezdrátové nabíjecí stanice	7
Obr. 4 Detail výkonového obvodu – blokový	9
Obr. 5 Vazebné elementy systému WPT – základní geometrie	. 11
Obr. 6 Vazebné elementy systému WPT – finální podoba	. 11
Tab. I Návrhové parametry 50kW vazebných elementů	. 12
Obr. 7 simulace 50 kW vazebných elementů – účinností mapa	. 12
Obr. 8 simulace 50 kW vazebných elementů – výkonová mapa	. 13
Obr. 9 simulace 50 kW vazebných elementů – napěťová mapa (U <sub>2</sub> )	. 13
Obr. 10 Přehled uvažovaných topologií řízení	. 14
Obr. 11 Zatěžovací charakteristika snižujícího pulzního měniče [4]	. 17
Obr. 12 Napěťové a proudové poměry oběru ze sítě – vlevo: využití diodového usměrňova	аčе,
vpravo: využití NPU s $\varphi_{U-I}$ =0	. 18
Obr. 13 Fázorový diagram pro fázu U při $\varphi_{U-I} = 0$	. 18
Obr. 14 Realizace řízení vstupního střídače	. 20
Obr. 15 Analogová část DAPLL (Simulink) – nahoře: logický část, dole: výstupní filtr	. 21
Obr. 16 Silová část simulace vstupního střídače	. 22
Obr. 17 Simulace vstupního střídače – Přehled	. 23
Obr. 18 Simulace DCAC – průběh regulace $\varphi_{U1I1}$ , dle předchozího popisu	. 23
Obr. 19 Simulace DCAC – průběh U a I na vazebných elementech	. 24
Obr. 20 Simulace DCAC – průběh U a I na vazebných elementech - detail	. 24
Obr. 21 Realizace řízení 3LNPU.	. 25
Obr. 22 Simulace 3LNPU – výkonová část	. 26
Obr. 23 3LNPU – přehled řízení	. 27
Obr. 24 Simulace 3LNPU – odebírané U a I z distribuční sítě	. 27
Obr. 25 Simulace $3LNPU - U_{DC1} a I_{DC1}$	. 28
Obr. 26 Realizace řízení sekundární strany	. 29
Obr. 27 Simulace sekundární části	. 30
Obr. 28 Simulace sekundární části – vstupní část (DCAC+ WPT)	. 30
Obr. 29 Simulace sekundární části – výkonový obvod	. 31
Obr. 30 Simulace sekundární části – DC2	. 31
Obr. 31 Simulace sekundárni části – DC3	. 32
Obr. 32 Topologie mériciho stanovisté	. 35
Obr. 33 Merici stanoviste	. 35
Tab. Il Parametry nabijeneno akumulatoru	. 36
Obr. 34 Vysledky mereni – hlavni prehled	.3/
Obr. 35 Vysledky mereni – ekvivalentni odpory a ucinnosti	. 38
Obr. 36 vysledky mereni – napeti, proudy a vykony	. 39
Obr. 37 vysledký merení – vedlejší prenied	. 39
Tab. III Popis Oscilografu	. 40
Tab. TV Legenud Oschografu	.40
Our 20 rožim CC $\mu = 124 M$	.41
Obt. 39 rezim CV lbst $\sim 0.5$ A	. 41
Obr. 40 rezim CV, Ibat ≈ 9,5 A	. 42

Obr. 41 režim CV, $I_{bat} \approx 2$ A	42
Obr. 42 Konec nabíjení, Ibat $\approx$ 1 A	43
Tab. V Dosažené účinnosti jednotlivých variant řízení	44

# Seznam tabulek

Tab.	I Návrhové parametry 50kW vazebných elementů	12
Tab.	II Parametry nabíjeného akumulátoru	36
Tab.	III Popis oscilografů	40
Tab.	IV Legenda oscilografů	40
Tab.	V Dosažené účinnosti jednotlivých variant řízení	44

# Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	8. 7. 2020	M. Zavřel

# Přílohy

Přehledové schéma výkonových prvků	49
Přehledové schéma řízení	50





Ochrany - SW
baterie
ıd baterie
UDC2
id UDC2
UDC1
Id UDC1
ení nulového <i>phase U-I</i>
sítě
sítě
ıd Sítě