

Fakulta elektrotechnická
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Základní návrh bloků bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů

Pracoviště: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Číslo dokumentu: 22190-011-2020
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Martin Zavřel, Pavel Drábek, Vladimír Kindl, Tomáš Kavalír
Vedoucí projektu: Zdeněk Peroutka
Počet stran: 62
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 intelligence, číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/18_069/0009855

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá návrhem výkonových bloků pro bezdrátovou nabíjecí stanici elektromobilů. Popisované řešení sestává z komplexního řetězce 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-Plecs a ověřen výsledky z 5kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice (respektive z nich vychází). 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, nabíjení baterie, návrh výkonových bloků.

Report title

Power Blocks Basic Design for Wireless Charging Stations of Electric-Vehicles.

Abstract

This research report deals with wireless charging station for electric vehicles basic power blocks design. Described topology 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-Plecs and verified by results of 5kW wireless charging station prototype (respectively is based on its results). 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, battery charging, power blocks design.

Seznam symbolů a zkratk

WPT	Wireless Power Transfer (bezdrátový přenos výkonu)
EV	Elektrické vozidlo
3LNPU	třífázový napěťový pulzní usměrňovač
ACDC	vstupní střídač bezdrátového přenosu výkonu
DCAC	výstupní usměrňovač bezdrátového přenosu výkonu
DCDC	stejnosemnný snižující pulzní měnič (zde v režimu pulzního měniče odporu)
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	stejnosemnný (ve smyslu stejnosemnný meziobvod)
AC	střídavý
MHD	městská hromadná doprava

Obsah

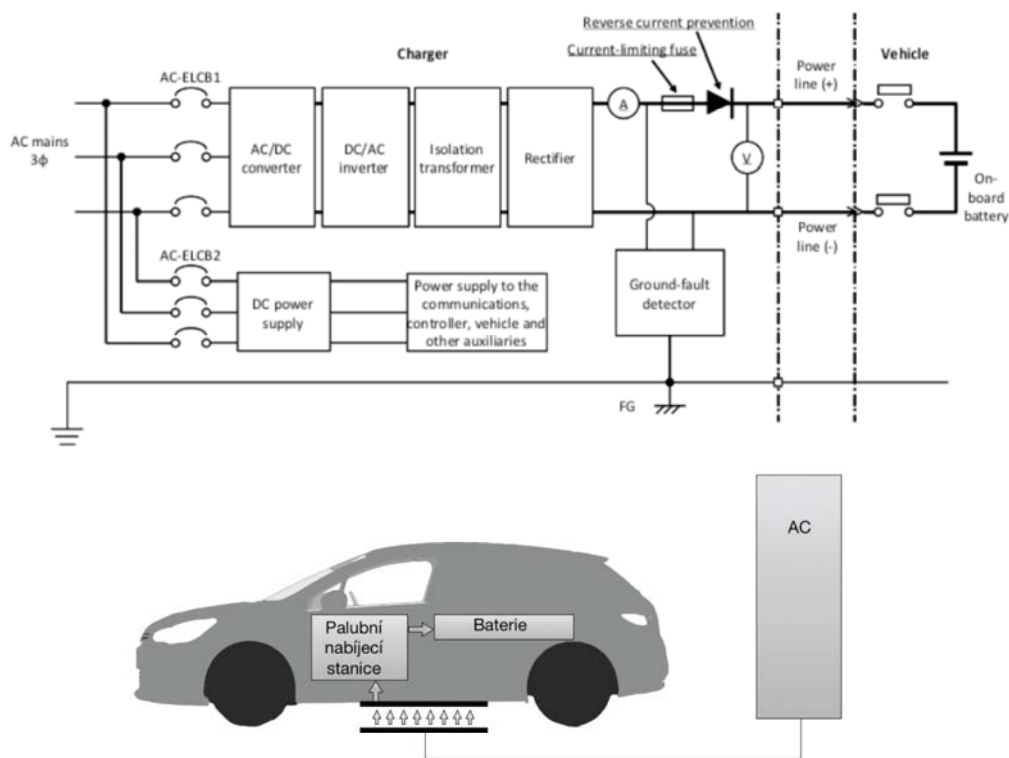
ANOTACE	2
KLÍČOVÁ SLOVA.....	2
REPORT TITLE	2
ABSTRACT	2
KEYWORDS	2
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	3
1 ÚVOD	5
2 TOPOLOGIE VÝKONOVÝCH PRVKŮ	7
3 TOPOLOGIE ŘÍZENÍ	8

4	VSTUPNÍ POZNATKY	10
4.1	Z POHLEDU PŘENOSU VÝKONU.....	10
4.2	Z POHLEDU BEZDRÁTOVÉ NABÍJECÍ STANICE	11
4.3	DEFINOVÁNÍ ZÁTĚŽE	12
4.4	VLASTNOSTI BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU VÝKONU (SYSTÉMU WPT)	12
5	NÁVRH VÝKONOVÝCH BLOKŮ BEZDRÁTOVÉHO PŘENOSU VÝKONU	16
5.1	VSTUPNÍ STŘÍDAČ.....	17
5.1.1	Návrh kapacit.....	17
5.1.2	Volba výkonových prvků.....	18
5.1.3	Simulace vstupního střídače.....	21
5.2	VÝSTUPNÍ USMĚŘŇOVAČ	25
5.2.1	Návrh kapacity	25
5.2.2	Volba výkonových prvků.....	26
5.2.3	Simulace výstupního usměřňovače	27
6	NÁVRH VÝKONOVÝCH BLOKŮ BEZDRÁTOVÉ NABÍJECÍ STANICE	32
6.1	SÍŤOVÝ NAPĚŤOVÝ PULZNÍ USMĚŘŇOVAČ	32
6.1.1	Návrh pasivních prvků	32
6.1.2	Volba výkonových prvků.....	34
6.1.3	Simulace 3LNPU	36
6.2	DCDC MĚNIČ V REŽIMU PULZNÍHO MĚNIČE ODPORU	41
6.2.1	Návrh pasivních součástek	41
6.2.2	Volba výkonových prvků.....	42
6.2.3	Simulace DCDC	43
7	SIMULACE BEZDRÁTOVÉ NABÍJECÍ STANICE	50
7.1	PRIMÁRNÍ ČÁST	50
7.1.1	Elektrické veličiny	51
7.1.2	Tepelné veličiny	51
7.2	SEKUNDÁRNÍ ČÁST	52
7.2.1	Elektrické veličiny	53
7.2.2	Tepelné veličiny	53
8	BILANCE BEZDRÁTOVÉ NABÍJECÍ STANICE	53
9	VÝROBA PROTOTYPU	54
10	ZÁVĚR	55
	LITERATURA	55
	SEZNAM OBRÁZKŮ	56
	SEZNAM TABULEK	58
	HISTORIE REVIZÍ	59
	PŘÍLOHY	60

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). Doplnění 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.

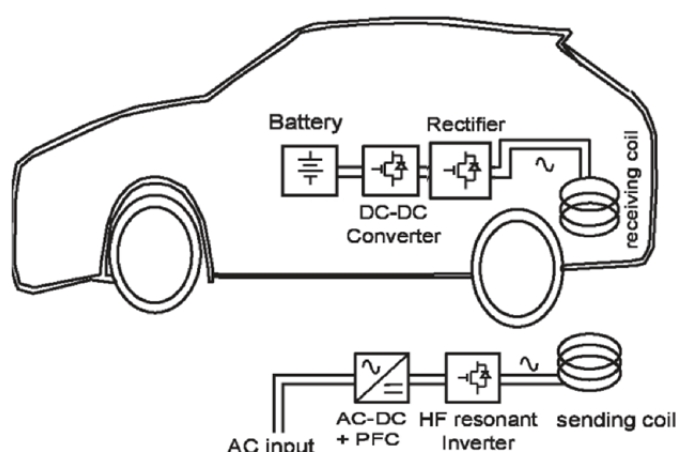
Běžné dobíjecí stanice se z pohledu přenosu energie rozdělují na stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrné dobíjecí stanice se skládají zpravidla z nepřímého měniče kmitočtu s galvanickým oddělením a usměrňovače. Ty střídavé jsou pak založeny zpravidla na nepřímém měniči kmitočtu s využitím palubní nabíjecí 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 nabíjecích 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

Obr. 1 Topologie kabelových dobíjecích stanic [1]

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 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 baterií.



Obr. 2 Topologie bezdrátové dobíjecí stanice

Pro správnou funkci bezdrátové nabíjecí stanice je potřeba specifické topologie výkonového obvodu, ta je rámcově naznačena na Obr.2 a detailněji řešena v této výzkumné zprávě. Řízení aplikované na zde popsaný výkonový řetězec je předmětem vlastní výzkumné zprávy 22190-012-2020.

V této zprávě je popsán návrh výkonového řetězce bezdrátové nabíjecí stanice ve smyslu návrhu jeho základních obvodových parametrů, tedy parametrů pasivních a polovodičových prvků. Návrh samotný je založen na analytických výpočtech, simulačních výsledcích a výsledcích získaných na 5 kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice.

Tato výzkumná zpráva rovněž obsahuje základní informace o navržených vazebných elementech pro 50 kW bezdrátový přenos výkonu a zmíněném aplikovaném řízení.

Celkově tato výzkumná zpráva slouží jako základní materiál pro detailní návrh a výrobu jednotlivých výkonových bloků 50 kW bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů.

2 Topologie výkonových prvků

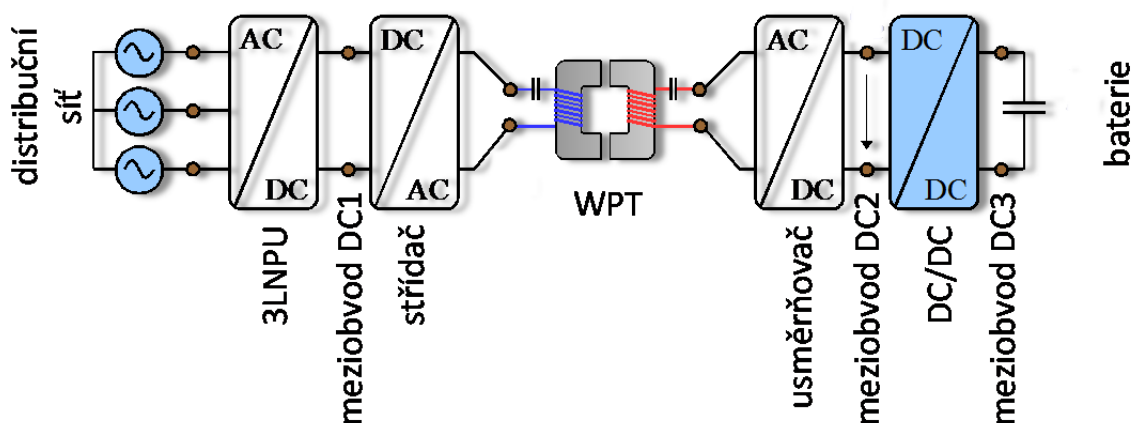
Pro kvalitní návrh výkonových bloků a řízení bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů je znalost uvažované topologie výkonových prvků nezbytná. Tato je uvedena na Obr. 3 a v příloze 1 v podobě přehledového schéma výkonových prvků 50kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice.

Poznámka: Návrh řízení 50kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů není předmětem této zprávy. Řízení aplikované na navrženou výkonovou část v této zprávě je popsáno v samostatné výzkumné zprávě 22190-012-2020

Topologie výkonových prvků sestává v těchto bloků:

- | | |
|-------------------------------------|------------|
| • vstupní 3-fázový filtr | 3LNPU |
| • napěťový pulzní usměrňovač | 3LNPU |
| • 1. DC meziobvod | DC1 |
| • 1-fázový střídač (H-můstek) | střídač |
| • bezdrátový přenos výkonu | WPT |
| • můstkový usměrňovač | usměrňovač |
| • 2. DC meziobvod | DC2 |
| • DC/DC měnič (snižující topologie) | DC/DC |
| • 3. DC meziobvod | DC3 |
| • Baterie | |

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



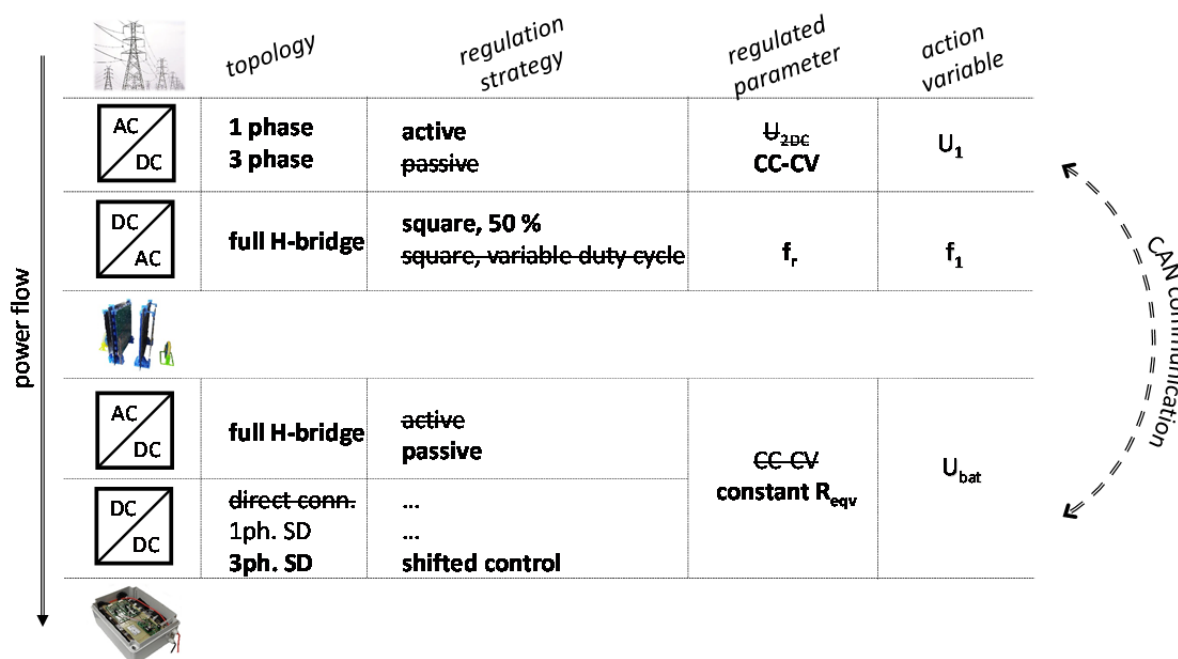
Obr. 3 Výkonová topologie bezdrátové nabíjecí stanice

V dalších částech této výzkumné zprávy je popsán základní návrh jednotlivých bloků 50 kW bezdrátové nabíjecí stanice.

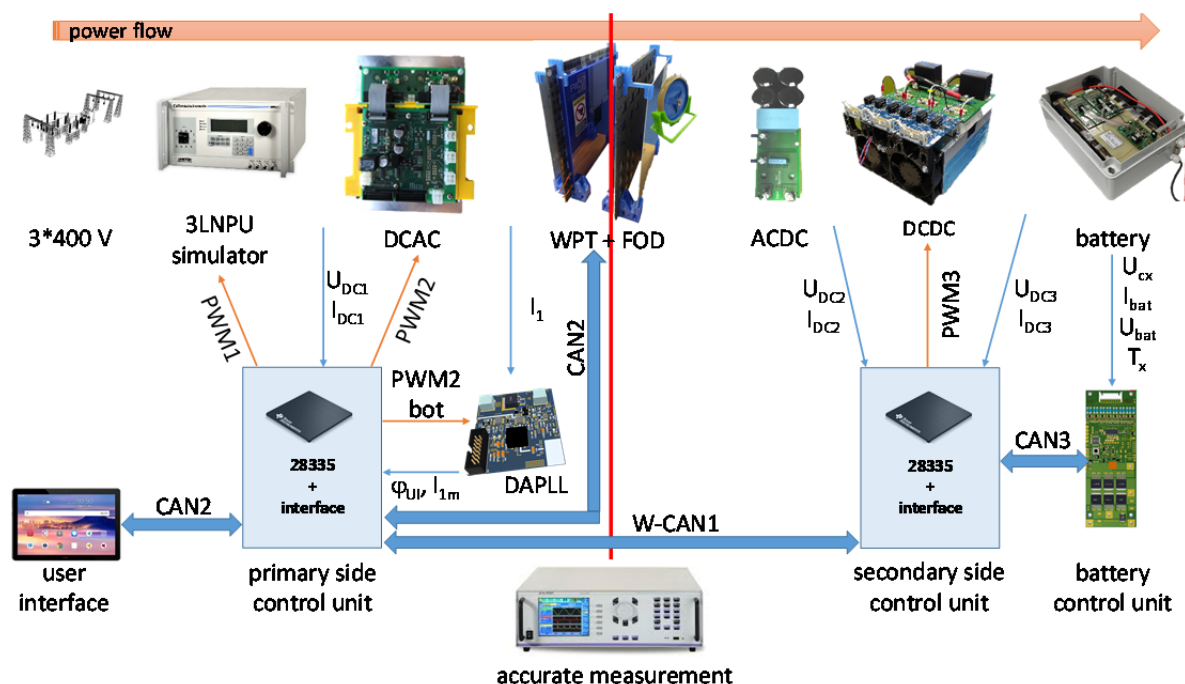
3 Topologie řízení

Uvažovaná topologie řízení bezdrátové nabíjecí stanice je pro návrh hardware velmi důležitá, neboť velmi ovlivňuje požadavky na dynamiku přechodných dějů, spínací frekvence, využití jednotlivých prvků, krajní parametry apod.

Na Obr. 4 je uvedena uvažovaná topologie řízení doplněná o topologii hardware. Obr. 5 pak zachycuje implementaci řízení z výzkumné zprávy 22190-012-2020.



Obr. 4 Topologie řízení.



Obr. 5 Přehledové schéma implementace řízení.

Topologie řízení tedy bezdrátovou nabíjecí stanicí dělí do dvou sekcí:

- Řízení nabíjení baterie v režimu CCCV pomocí 3LNPU.
- Řízení optimální zátěže pomocí DCDC měničem coby měniče odporu.

Detailní přehled o navrženém a implementovaném řízení zprostředkovává příloha 2, na které je uvedeno přehledová schéma řízení.

Detailně se řízením „CCCV pomocí 3LNPU ve spojení s DCDC měničem s regulací na R_L dle (4)“ zabývá výzkumná zpráva 22190-012-2020.

4 Vstupní poznatky

Vstupní poznatky pro návrh hardware vycházejí z dosavadního vývoje samotného bezdrátového přenosu výkonu (5kW prototypu) a jeho rozšíření do bezdrátové nabíjecí stanice. Tedy z návrhů a simulací vazebných elementů a jejich chování v reálném provozu a při různých parametrech. Tato kapitola popisuje hlavní ukazatele pro návrh hardware bezdrátové nabíjecí stanice. Problematiku vstupních poznatků pak dokresluje Obr. 6. Vše ve spojitosti s aplikovaným řízením bezdrátové nabíjecí stanice dle výzkumné zprávy 22190-012-2020.

4.1 Z pohledu přenosu výkonu

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

- η_{trans} a $P_2 = f(f_1)$
- η_{trans} a $P_2 = f(R_L)$
- η_{trans} a $P_2 = f(U_1)$

Závislost přenosové účinnosti η_{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).

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

$$M = kL \quad (2)$$

Poznámka: Systém WPT v uvažované podobě využívá pro přenos výkonu magnetickou, rezonanční, sério-sériově kompenzovanou vazbu. Pro správnou funkčnost je nutné udržovat f_1 na hlavním rezonančním kmitočtu této vazby.

Základní rovnici pro uvažovanou topologii vazebných elementů je:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\left(\omega_\mu L - \frac{1}{\omega_\mu C_1}\right) & -j\omega_\mu M \\ -j\omega_\mu M & R_2 + R_L + j\left(\omega_\mu L_2 - \frac{1}{\omega_\mu C_2}\right) \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \frac{2\sqrt{2}u_{m1}}{\pi\mu} \\ 0 \end{bmatrix},$$

kde μ 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 η_{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).

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

$$R_L (\eta \rightarrow \max) = \sqrt{R^2 + M^2 \omega^2} \quad (4)$$

$$R_L (P_2 \rightarrow \max) = \sqrt{\frac{C^2 M^4 \omega^6}{(CL\omega^2 - 1)^2}} \quad (5)$$

Závislost přenosové účinnosti η_{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). Odchytky od $p=1$ navrhovaná regulace vyeliminuje (kapitola 4.3).

$$P_2 = P_1 \eta \rightarrow P_2 = \frac{p^2 U_1^2}{R_L}; \text{při zanedbání ztrát} \quad (6)$$

$$P_2 \approx \frac{U_1^2}{R_L} \approx I_1^2 R_L \quad (7)$$

4.2 Z pohledu bezdrátové nabíjecí stanice

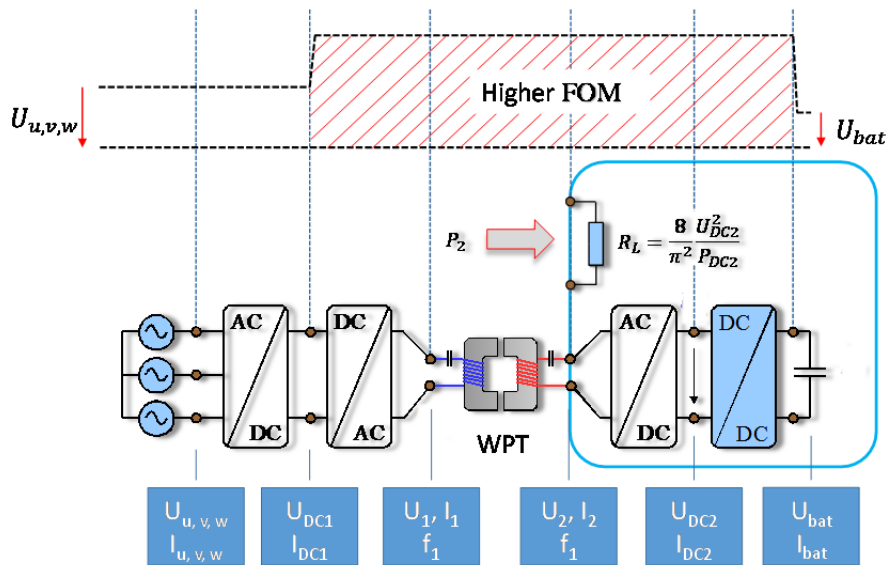
Z návrhů, simulací a testování vazebných elementů je pro volbu výkonové topologie důležité zejména:

- η_{trans} a $P_2 = f(FOM)$

Závislost přenosové účinnosti η_{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 (η_{trans}) je výhodné navýšit vstupní napětí U_1 , tedy U_{DC1} , tedy FOM .

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

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



Obr. 6 Detail výkonového obvodu – blokový

4.3 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).

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

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

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

$$R_{bat\ eqv} = \frac{U_{bat}}{I_{bat}} \quad (11)$$

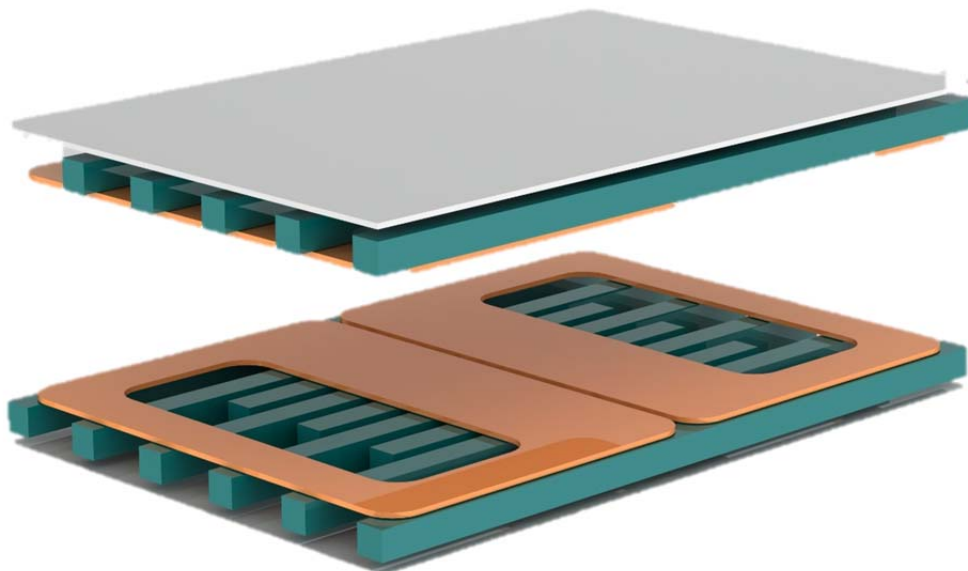
Rovnice (12) plní pouze formální charakter definice kapacity akumulátoru z definice akumulovaného náboje $Q_{bat\ max}$ a napětí vnitřního napětí akumulátoru $U_{int\ max}$.

$$C_{bat} = \frac{U_{int\ max}}{Q_{bat\ max}} \quad (12)$$

4.4 Vlastnosti bezdrátového přenosu výkonu (systému WPT)

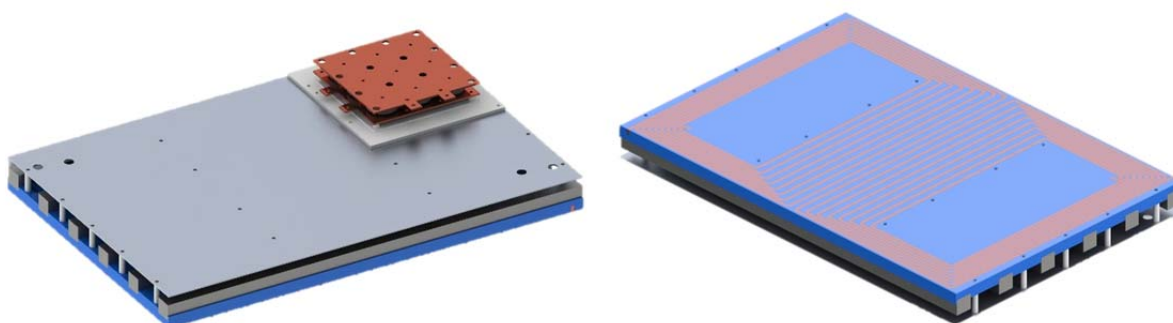
Hardware (a řízení) v této výzkumné zprávě je cílen na 50kW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice. Aby bylo možné správně navrhnout hardware a řízení (v.z. 22190-012-2020) takovéto nabíjecí stanice, je důležité znát chování jádra systému a mít jeho detailní návrh. Jádrem systému je pochopitelně bezdrátový 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. 7 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. 8 Vazebné elementy systému WPT – finální podoba

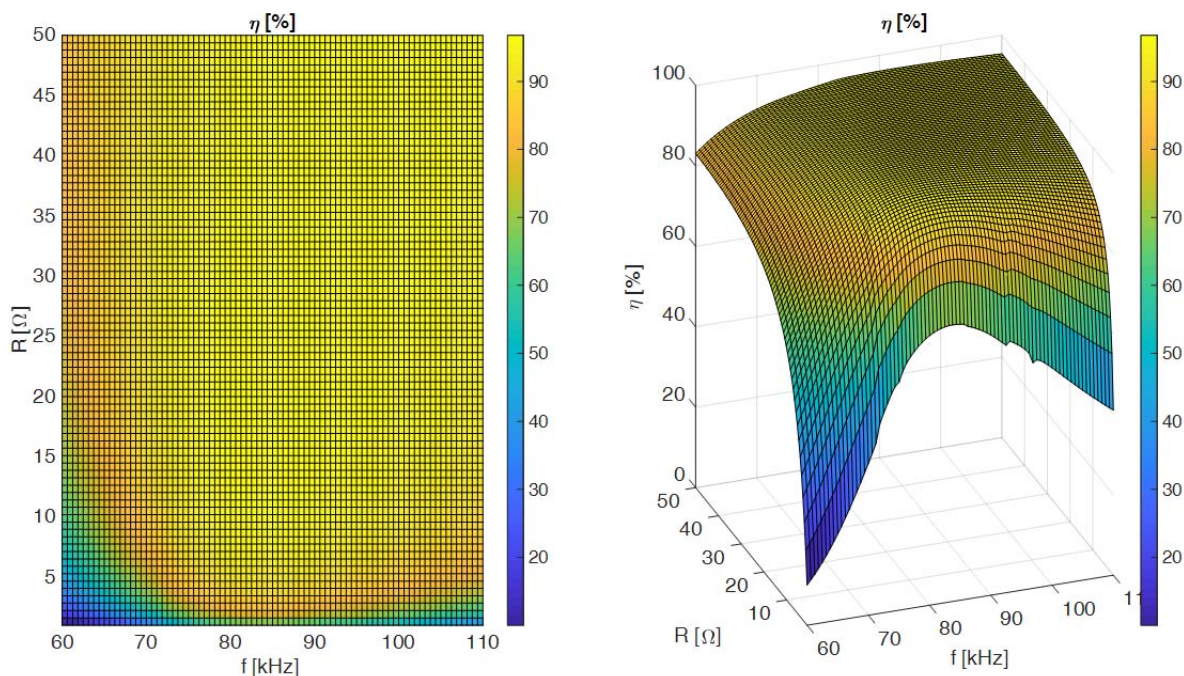
Pro potřeby návrhu výkonových bloků bezdrátového přenosu výkonu jsou důležité obvodové (návrhové) parametry vazebných elementů, které jsou zachyceny v Tab. I. Především se jedná o f_0 (1), R_L (4) a U_1 (8).

Tab. 1 Návrhové parametry 50kW vazebných elementů

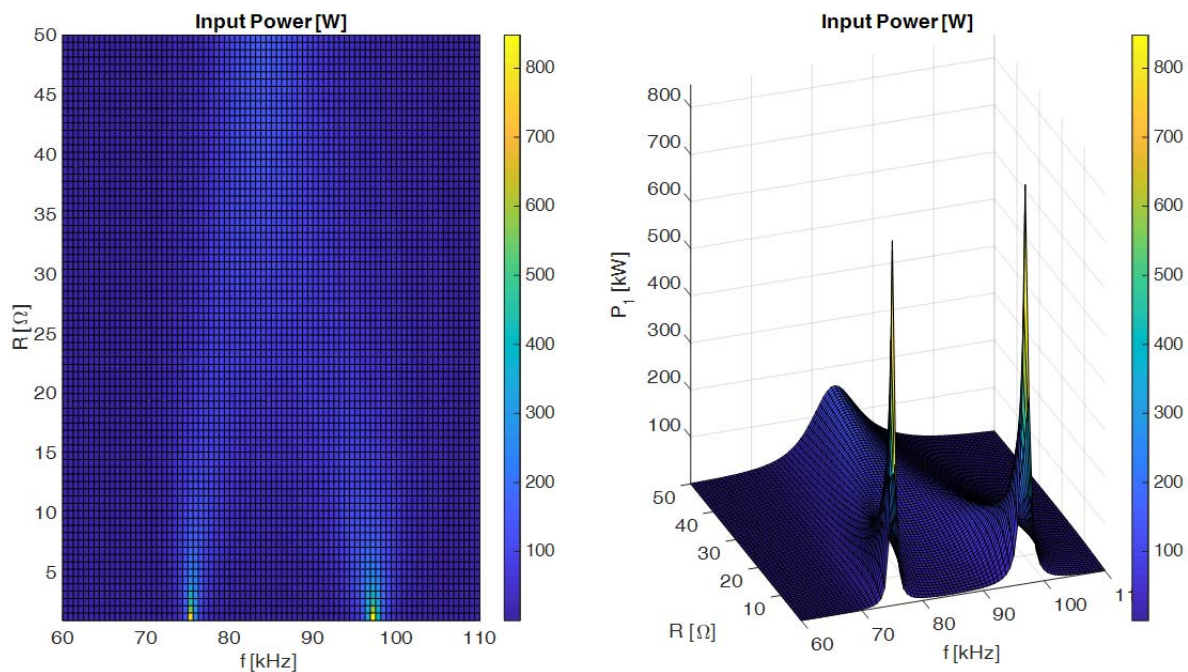
parametry vaz. el. 50 kW	
veličina	velikost
n [/]	2*8
ρ_{Cu} [mm ²]	2*10
L [μH]	119,8
k [/]	0,25
C [nF]	30
f_0 [kHz]	83,952
U_1 [V _{ef}]	1000
I_1 [A _{ef}]	57
U_2 [V _{ef}]	1000
I_2 [A _{ef}]	53
P [kW]	50
R_L [Ω]	15,8

Aby bylo možné návrh výkonových bloků pod aplikovaným řízením (výzkumná zpráva XXX) 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) ($R_L=15,8 \Omega$):

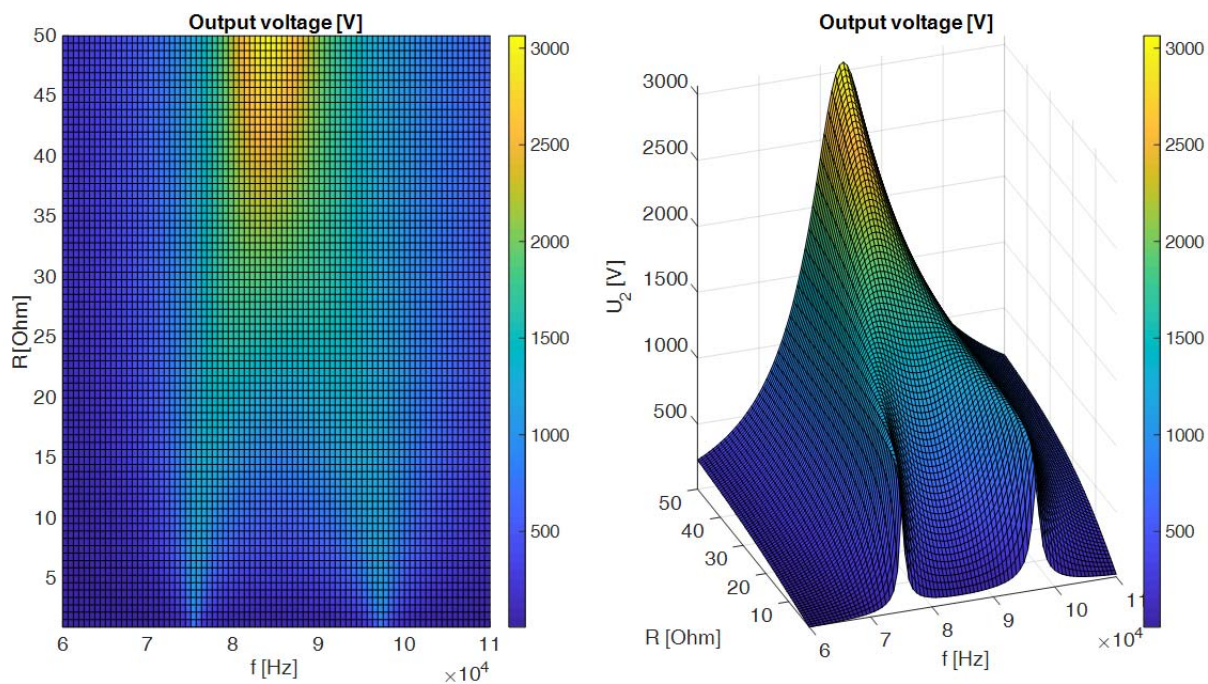
- $\eta \rightarrow$ maxima ($> 96 \%$)
- $P_1 \rightarrow P_1$ jmenovitý ($\approx 50 \text{ kW}$)
- $U_2 \rightarrow U_2 \approx U_1$ (1000 V)



Obr. 9 simulace 50 kW vazebných elementů – účinností mapa



Obr. 10 simulace 50 kW vazebných elementů – výkonová mapa



Obr. 11 simulace 50 kW vazebných elementů – napěťová mapa (U_2)

5 Návrh výkonových bloků bezdrátového přenosu výkonu

V této kapitole je uveden podrobný popis návrhu výkonových bloků bezdrátového přenosu výkonu. Systém bezdrátového přenosu výkonu se skládá z vazebných elementů, vstupního střídače a výstupního usměrňovače.

Na návrh výkonových bloků bezdrátového přenosu výkonu navazuje návrh zbývajících dvou bloků bezdrátové nabíjecí stanice z kapitoly 6.

Pro návrh výkonových bloků bezdrátového přenosu výkonu vazebnými elementy dle kapitoly 4.4 a Tab. I je velmi důležitá rozvaha parametrů. Ta je uvedena v Tab. II. Zde jde o teoreticky vypočítané či odvozené hodnoty vycházející z návrhu vazebných elementů.

Stranu střídače lze založit na znalosti návrhového napětí U_1 a proudu I_1 primárním vazebným členem. Poté lze stanovit proud I_{DC1} z návrhového výkonu P_{DC1max} 50 kW a napětí U_{DC1} 1000 V. Obdobnou úvahu lze aplikovat na stav minimálního napětí U_{DC1min} , které je dáno (13). U_{UV} zde zastupuje sdružené napětí sítě a 110% stanovuje minimální nastavené navýšení napětí pomocí 3LNPU. Rozvaha strany střídače je také ověřena simulačně.

$$U_{DC1min} = 110\% \{U_{UVrms}\sqrt{2}\} \quad (13)$$

Stranu usměrňovače je možné založit na návrhových parametrech sekundárního vazebného elementu. Zde se ve spojení s usměrňovačem uplatňuje amplituda první harmonické daná (14). Právě vlivem usměrňovače se na druhém DC-linku (U_{DC2max}) objeví efektivní hodnota U_{2rms} . Stejnou úvahu lze aplikovat i pro stav U_{DC1min} . Proud I_{DC2min} a I_{DC2max} pak vychází z výkonové bilance. Parametry jsou opět kontrolovány simulačně.

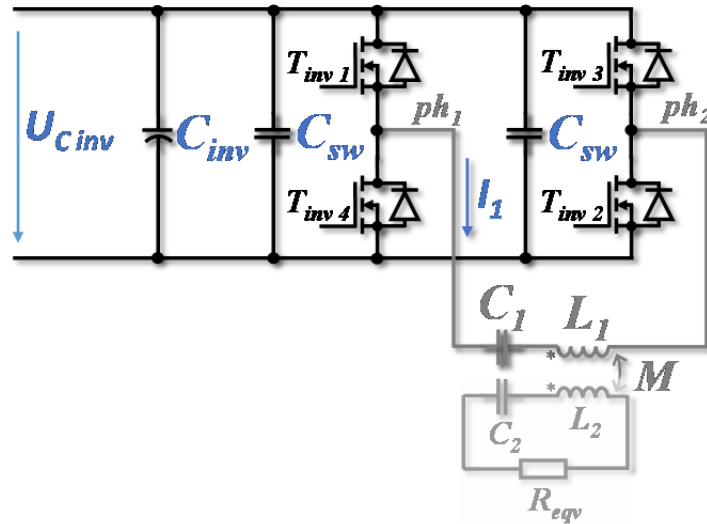
$$U_{2p} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{1p} \quad (14)$$

Tab. II Rozvaha parametrů bezdrátového přenosu

střídač			usměrňovač		
veličina	hodnota	jednotky	veličina	hodnota	jednotky
U_{1rms}	1000	V	U_{2rms}	785,398	V
U_{1p}	1000	V	U_{2p}	1110,721	V
I_{1rms}	57,983	A	I_{2rms}	57,275	A
I_{1p}	82	A	I_{2p}	81	A
f_1	85	kHz	f_2	85	kHz
f_{sw}	85	kHz	f_{sw}	85	kHz
U_{DC1min}	622,254	V	U_{DC2min}	488,717	V
U_{DC1max}	1000	V	U_{DC2max}	785,398	V
I_{DC1min}	13,5	A	I_{DC2min}	17,189	A
I_{DC1max}	50	A	I_{DC2max}	63,662	A
P_{DC1max}	50	kW	P_{DC2max}	50	kW
P_{DC1min}	8,400	kW	P_{DC2min}	8,400	kW

5.1 Vstupní střídač

Uvažovaná výkonová topologie vstupního střídače (DCAC) je uvedena na Obr. 12. Jde o klasický jednofázový (plný) můstek pracující jako rezonanční střídač. Výkonové transistory $T_{inv\ 1-4}$ jsou uvažovány „full SiC MOSFETs“, spínací kondenzátory C_{sw} jsou uvalovány keramické a kapacitní banka C_{inv} je uvažována svitková. Návrh jednotlivých komponent vychází ze stanovených obvodových parametrů v Tab. II.



Obr. 12 Výkonová topologie DCAC

5.1.1 Návrh kapacit

Návrh kapacit vychází z běžně aplikovaného přístupu zajištění dovoleného zvlnění napětí střídače $\Delta U_{C_{inv}}$. Vztah (15) vyjadřuje minimální potřebnou kapacitu kondenzátorové baterie C_{inv} a vztah (16) vyjadřuje minimální kapacitu spínacích kondenzátorů C_{sw} . Jak je z (15,16) patrné, návrh střídače nelze zcela oddělit od návrhu zdroje DC napětí, tedy v našem případě od 3LNPU. To je respektováno vztahem (17), který stanovuje velikost vsazené indukčnosti L_{DC1} mezi 3LNPU a DCAC (viz kapitola 6.1).

$$C_{inv} \geq \frac{\Delta U_{DC1max}}{\Delta U_{C_{inv}} m^2 \omega_0^2 L_{DC1}}, \quad (15)$$

kde ΔU_{DC1max} představuje maximální zvlnění výstupního napětí z 3LNPU (z jeho výstupního filtru), viz kapitola 6.1. m pak představuje počet fází střídače, tedy 1.

$$C_{sw} \geq \frac{I_{1rms}}{\Delta U_{C_{inv}} f_0} \quad (16)$$

$$L_{DC1} \approx \frac{|\Delta U_{DC1max} - \Delta U_{C_{inv}}|}{\omega_0 I_{1rms}} \quad (17)$$

Pro návrh kondenzátorů je také velmi důležité stanovení jejich proudového zatížení. Kapacitní banka C_{inv} kryje především odebíraný proud I_1 . Spínací kondenzátory C_{snub} poté kryjí komutační proudy.

Potřebné parametry kapacit DCAC pro 50 kW prototyp bezdrátové dobíjecí stanice zachycuje Tab. III. **Dovolené zvlnění na 3LNPU je stanoveno na 10 V (ΔU_{DC1max}) a dovolené zvlnění na střídači $\Delta U_{C_{inv}}$ 1,5 V.** Pro stanovení napětí je uvažován bezpečnostní index minimálně 1,7. Zvolené konkrétní typy kondenzátorů zachycuje následující Tab. IV, ve které jsou uvedeny hlavní parametry těchto vybraných kondenzátorů.

Tab. III Parametry kapacit DCAC

	C [μ F]	I [A]	U [V]
C _{inv}	954	60	1700
C _{sw}	120	85	1700

Tab. IV Vybrané kondenzátory pro 50kW prototyp

	C _{inv}	C _{sw}
výrobce	TDK	TDK
typ	B25690C2487K003	B58035U9255M001
C [μ F]	480	2,5
I [A]	100	23
I _p [kA]	8,1	
U [V]	2000	900
řazení	1S2P	2S2P
C _c [μ F]	960	2,5
I _c [A]	200	46
I _{pc} [kA]	16,2	
U _c [A]	2000	1800

Návrh kapacit je opět podpořen simulačně.

5.1.2 Volba výkonových prvků

Volba výkonových prvků také vychází z návrhových parametrů primárního vazebného elementu. Typ součástek je dán především aplikací samotnou, ve které je spínací kmitočet $f_{sw} = f_0 \approx 85$ kHz s tlakem na minimalizaci ztrát, tedy „full SiC MOSFETs“. Další důležité parametry jsou blokovací napětí > 1000 V (uvažován bezpečnostní koeficient 1,7 – tedy $U_{DS} = 1700$ V) a propustný proud $I_{DS} > 82$ A. Právě velké blokovací napětí při nemalém propustném proudu je značně limitujícím aspektem při výběru výkonových prvků. Portfolio výrobců je omezeno „ROHM“, „Microsemi“ a „Wolfspeed“. Hlavní katalogové hodnoty vybraných prvků jsou uvedeny v Tab. V.

Tab. V Základní parametry uvažovaných polovodičových prvků (MOSFETs)

poř.č.	název	pouzdro	výrobce	U _{DSmax} [V]	I _{DS 100°C} [A]	V _{GS} [V]	T _j [°C]	E _{on} [mJ]	E _{off} [mJ]	Q _G [nC]	R _{DSon} [Ohm]	U _d [V]	Q _{rr} [nC]	R _{th j-c} [K/W]	á [Kč]
1	C2M0045170D	TO247-3	Wolfspeed	1700	48	- 5/+20	150	2,1	0,86	188	90	4,1	530	0,24	2013
2	C2M0045170P	TO247-4	Wolfspeed	1700	48	- 5/+20	150	0,67	0,31	188	90	4,1	2000	0,24	1846
3	MSC045SMA170B	TO 247 sample	Microsemi	1700	45		150				45				
4	APTM170AM30CT1AG	SP1	Microsemi	1700	74	- 5/+20	150	4,4	3	380	45	4,1	1000	0,18	
5	APTM170AM60CT1AG	SP1	Microsemi	1700	37	- 5/+20	150	2,2	1,5	190	90	4,1	530	0,36	
6	MSCMC170AM08CT6LIAG	SP6Li	Microsemi	1700	207	- 5/+20	150	13,2	9	1128	15	4,1	3200	0,056	
7	BSM250D17P2E004	E	ROHM	1700	225	- 6/+22	150	22	7		17	1,8	4,4	0,083	21000
8	CAS300M17BM2	62mm	Wolfspeed	1700	225	- 5/+20	150	13	10		20	2,5	4,4	0,065	19726

Pro bližší výběr prvků byla provedena analýza výkonových ztrát (Tab. VII) dle základních vztahů (18-24). Zcela základní je úvaha maximální proudové zatížitelnosti prvků, která pro případ 50 kW nabíjecí stanice vede na Tab. VI. Zde je patrná převaha potřeby paralelního řazení prvků či modulů (poř.č. 1-5). Poté je možné stanovit maximální a střední proudy jednotlivými prvky (22, 23) a velikost vypínaného proudu (24) při uvážení rozladění $f_0 \neq f_{sw}$. Z takto získaných proudů je možné stanovit střední výkonové ztráty jednotlivých MOSFET (18,19) a zpětných diod (20, 21).

$$\Delta P_{on\ av} = R_{DSon} I_{DSav\ p}^2 \quad (18)$$

$$\Delta P_{sw\ av} = (E_{on} + E_{off}) f_{sw} \frac{I_{DSav\ p}}{I_{DS\ nom}} \quad (19)$$

$$\Delta P_{d\ av} = U_d I_{DS\ sw} + R_d I_{DS\ sw}^2 \quad (20)$$

$$\Delta P_{rr} = Q_{rr} U_{DS\ off} f_{sw} \frac{I_{DS\ sw}}{I_{DS\ nom}} \quad (21)$$

$$I_{DSm\ p} = \frac{I_{DSm}}{p} \quad (22)$$

$$I_{DSav\ p} = \frac{I_{DSm\ p}}{2}; 50\% \text{ střidu} \quad (23)$$

$$I_{DS\ sw} = 15\% \{I_{DSav\ p}\} \quad (24)$$

Tab. VI Stanovení paralelního řazení a proudů prvky

	název	počet paralelních prvků	$I_{DSm\ p}$ [A]	$I_{DSav\ p}$ [A]	$I_{DS\ sw\ av}$ [A]	$I_{d\ av}$ [A]
1	C2M0045170D	2	41	20,5	3,075	0
2	C2M0045170P	2	41	20,5	3,075	0
3	MSC045SMA170B	2	41	20,5	3,075	0
4	APTMC170AM30CT1AG	2	41	20,5	3,075	0
5	APTMC170AM60CT1AG	3	27,333	13,667	2,05	0
6	MSCMC170AM08CT6LIAG	1	82	41	6,15	0
7	BSM250D17P2E004	1	82	41	6,15	0
8	CAS300M17BM2	1	82	41	6,15	0

Tab. VII Výkonové ztráty na prvcích

	název	$dP_{on\ av}$ [W]	dP_{sw} [W]	$dP_{d\ av}$ [W]	dP_{rr} [W]	dP_{prvek} [W]	$dP_{kombinace}$ [W]
1	C2M0045170D	37,823	16,118	0,000	0,000	53,941	107,881
2	C2M0045170P	37,823	5,336	0,000	0,000	43,159	86,318
3	MSC045SMA170B	18,911	0,000	0,000	0,000	18,911	37,823
4	APTCMC170AM30CT1AG	18,911	26,138	0,000	0,000	45,049	90,098
5	APTCMC170AM60CT1AG	16,810	17,425	0,000	0,000	34,235	102,705
6	MSCMC170AM08CT6LIAG	25,215	56,063	0,000	0,000	81,278	81,278
7	BSM250D17P2E004	28,577	67,377	0,000	0,000	95,954	95,954
8	CAS300M17BM2	33,620	53,437	0,000	0,000	87,057	87,057

Po provedení analýzy výkonových ztrát byla provedena analýza střední teploty čipů (26) a chladiče (25) při okolní teplotě $T_a = 60\ ^\circ\text{C}$, tepelném odporu chladiče $R_{th} = 0,2\ ^\circ\text{C}\text{W}^{-1}$ (viz kapitola 7.1) a respektování izolačních podložek s $R_{th} = 0,05$. Výsledky poté zachycuje Tab. VIII.

$$T_{ch\ av} = T_a + 2pR_{th\ ch-a} \sum_{i=on\ av; sw; d\ av; rr} \Delta P_i \quad (25)$$

$$T_{j\ av} = T_a + T_{ch\ av} + R_{th\ j-c} \sum_{i=on\ av; sw; d\ av; rr} \Delta P_i \quad (26)$$

Tab. VIII tepelná analýza prvků

	název	$dP_{av\ ch}$ [W]	T_{ch} [W]	T_j [°C]
1	C2M0045170D	215,763	103,153	118,795
2	C2M0045170P	172,636	94,527	107,043
3	MSC045SMA170B	75,645	75,129	76,075
4	APTCMC170AM30CT1AG	180,195	96,039	106,400
5	APTCMC170AM60CT1AG	205,410	101,082	115,118
6	MSCMC170AM08CT6LIAG	162,556	92,511	101,127
7	BSM250D17P2E004	191,907	98,381	111,143
8	CAS300M17BM2	174,113	94,823	104,834

Při zvážení pořizovací ceny (Tab. V), počtu paralelních prvků (Tab. VI) a dostupnosti byl výběr zúžen na tři možné prvky:

- [1, C2M0045170D](#) - TO247 - 3
- [2, C2M0045170P](#) - TO247 - 4
- [4, APTCMC170AM30CT1AG](#) - SP1 (phase leg)

Diskrétní MOSFETs jsou si prakticky rovnocenné. Nasnadě je tedy volba mezi paralelním řazením diskretních součástek či modulů. Z hlediska konstrukce a návaznosti na další výkonové bloky bezdrátové nabíjecí stanice byly zvoleny diskretní MOSFETs C2M0045170D (nebo ...P). Dále je pro DCAC uvažován [C2M0045170D](#).

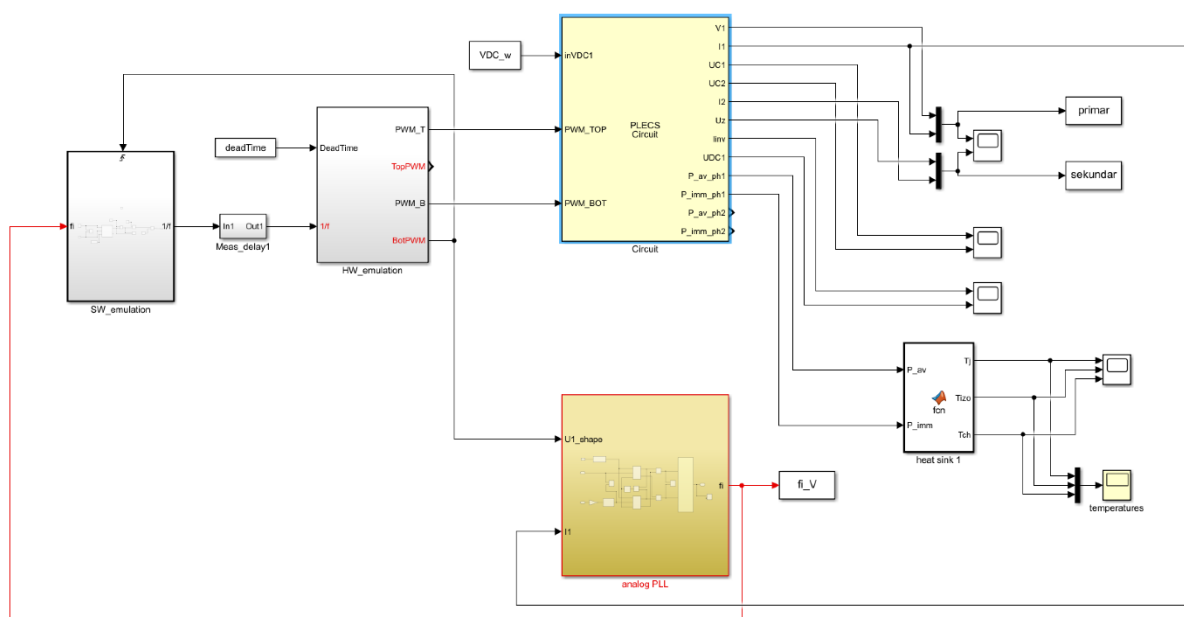
5.1.3 Simulace vstupního střídače

Simulace vstupního střídače je realizována v prostředí Matlab – Simulink a to ve dvou verzích. Základní simulace nezohledňuje napájení střídače, tedy 3LNPU a filtry meziobvodu DC1. Tato verze simulace je výpočetně velmi rychlá a umožňuje rychlé ladění regulace a rychlé tepelné simulace. Pro ověření správného chování vstupní části střídače (tady návrh C_{inv} a C_{sw}) slouží komplexní verze simulace primární strany (viz kapitola 7.1.).

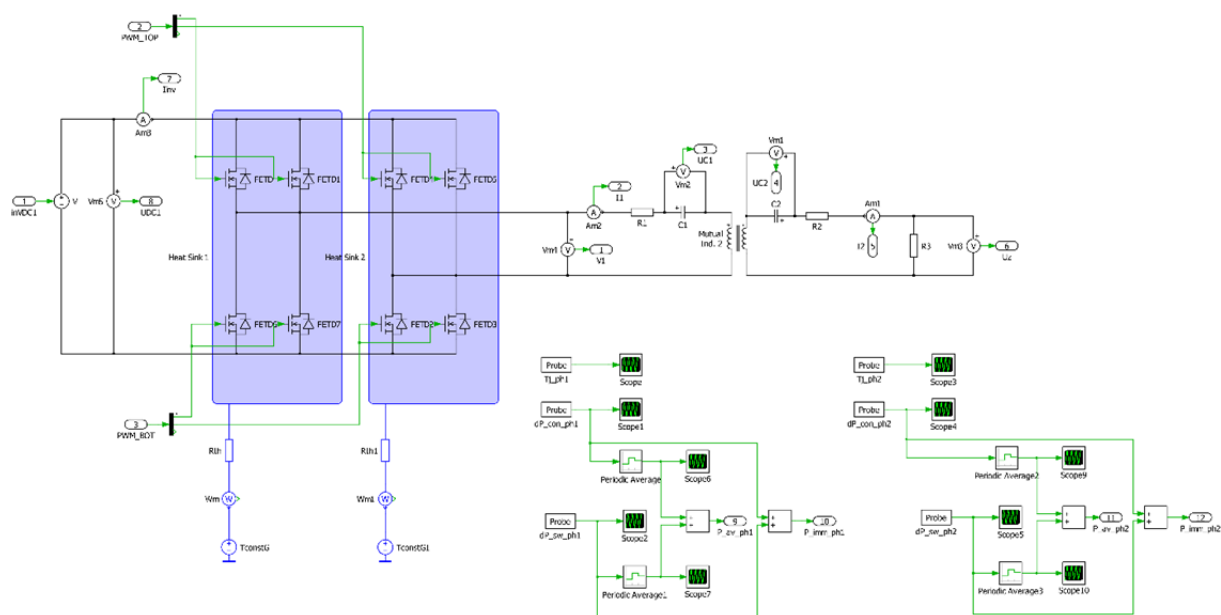
Simulace byla provedena s konstantním krokem $1/f_0/1000$ s diskreditací na $5 \cdot \text{sim_step}$.

Obr. 13 zachycuje základní simulaci vstupního střídače (DCAC). Popis regulačních bloků je uveden v samostatné zprávě (22190-012-2020. Z hlediska návrhu výkonové části je stěžejní pravá třetina simulačního schématu spolu s blokem Simulink – Plecs (*Circuit*), který je detailně zobrazen na Obr. 14.

Pravá horní část zachycuje výstupy elektrických veličin jako je U_1 , I_1 , U_2 , I_2 , I_{inv} , U_{c1} , U_{c2} , U_{DC1} a U_z . Uvedené veličiny jsou měřeny dle Obr. 14. pravé dolní část Obr. 13 pak zachycuje blok výpočtu teplot v ustáleném stavu a jejich výstupy. S touto částí souvisí tepelný model, který je součástí Obr. 14.

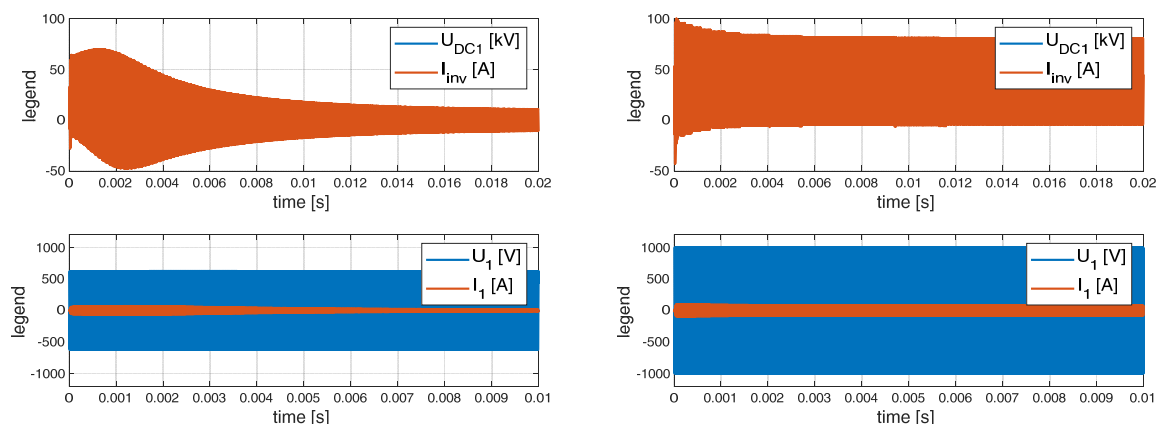


Obr. 13 Základní simulace DCAC

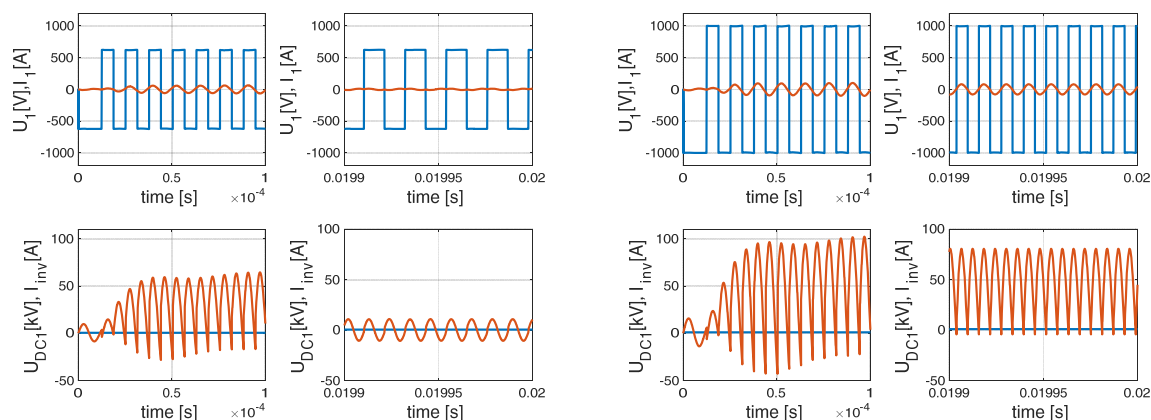


Obr. 14 Výkonový obvod DCAC

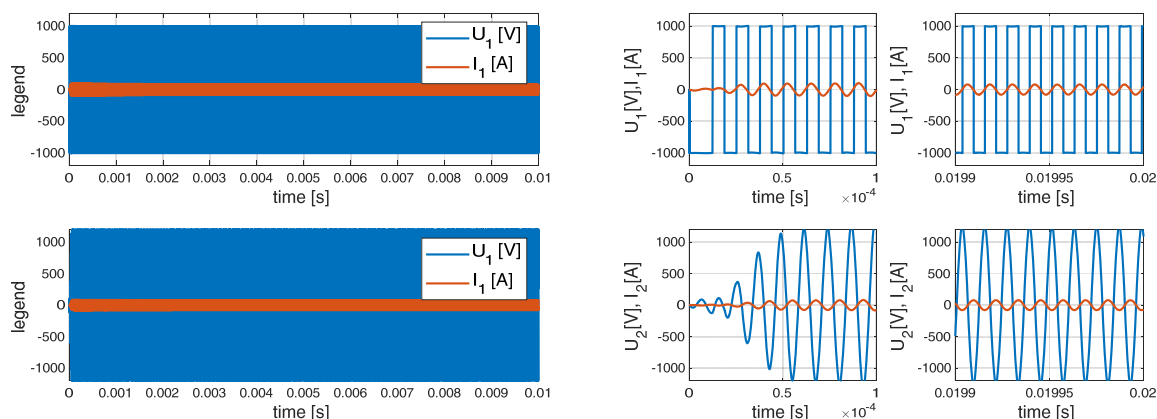
Základními výstupy elektrických veličin této simulace z pohledu návrhu vstupního střídače jsou pro start z nenulových počátečních podmínek uvedeny na Obr. 15. Obr. 16 pak zachycuje detail zapnutí a ustáleného stavu. Pro úplnost reprezentace výsledků této simulace je zde uveden Obr. 17, který zachycuje také výstupní napětí a proud sekundárního vazebného elementu.



Obr. 15 Elektrické veličiny DCAC – vlevo při $U_{DC1} = 622$ V (strat z 50 kW), vpravo při $U_{DC1} = 1000$ V (start z 50 kW)



Obr. 16 Elektrické veličiny DCAC - vlevo při $U_{DC1} = 622$ V (strat z 50 kW), vpravo při $U_{DC1} = 1000$ V (start z 50 kW)



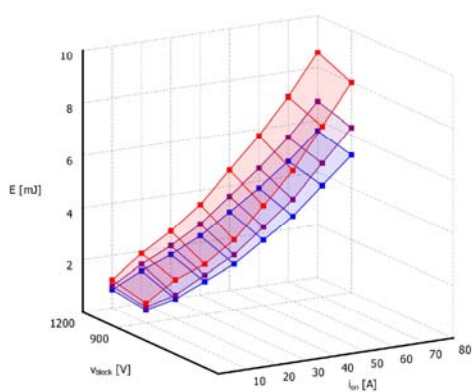
Obr. 17 Elektrické veličiny vazebných elementů při $U_{DC1} = 1000$ V: vlevo makro, vpravo: detail zapnutí do nenulových poč. pod. a ustáleného stavu

Tepelný model vstupního střídače je založen na ztrátovém modelu zvoleného MOSFET (C2M0045170D) v prostředí Pecs (vytvořen dle datasheetu výrobce a porovnán s modely výrobce – viz kapitola 6.1). Zběžně je tento model vyobrazen na Obr. 18. Výstupy ztrátového modelu jsou zpracovávány dle dolní části Obr. 14 a dodávány do výpočtu teplot v ustáleném stavu (viz Obr. 13). Výstupy ztrátového modelu pro jednu fázi střídače (umístěné na chladiči 1) jsou také uvedeny na obr. 19. Následující Obr. 20 zachycuje výstup výpočtu teplot v ustáleném stavu.

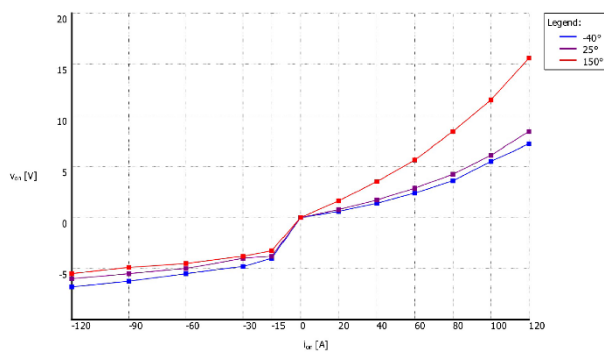
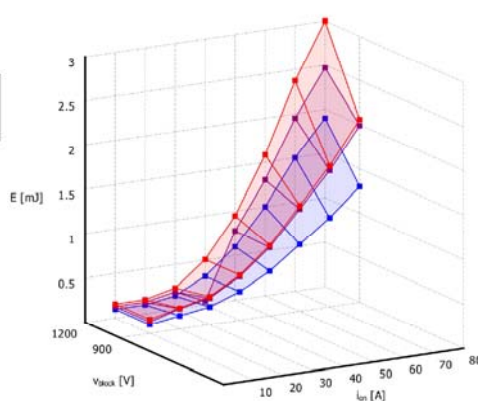
Při porovnání výkonových ztrát a teplot získaných z výpočtů a ze simulací je evidentní perfektní shoda pro střední hodnoty teplot ($T_j = 115.5^\circ\text{C}$ z výpočtu a 118.9°C ze simulace) a ztrátových výkonů ($dP_{on} = 25,5$ vs $37,8$ W a $dP_{sw} = 16,9$ vs $16,1$ W – simulace vs výpočet). Vzhledem k velké spínací frekvenci a měkkému spínání je rozdíl mezi okamžitými a středními hodnotami téměř nulový. Maximální teploty čipů MOSFET dosahují dle simulace teplot v ustáleném stavu pouze 116°C .

Součástí tepelného modelu a výpočtů jsou také keramické izolační podložky pod zvolené prvky s $R_{th} = 0,04 \text{ KW}^{-1}$.

Turn-on losses:

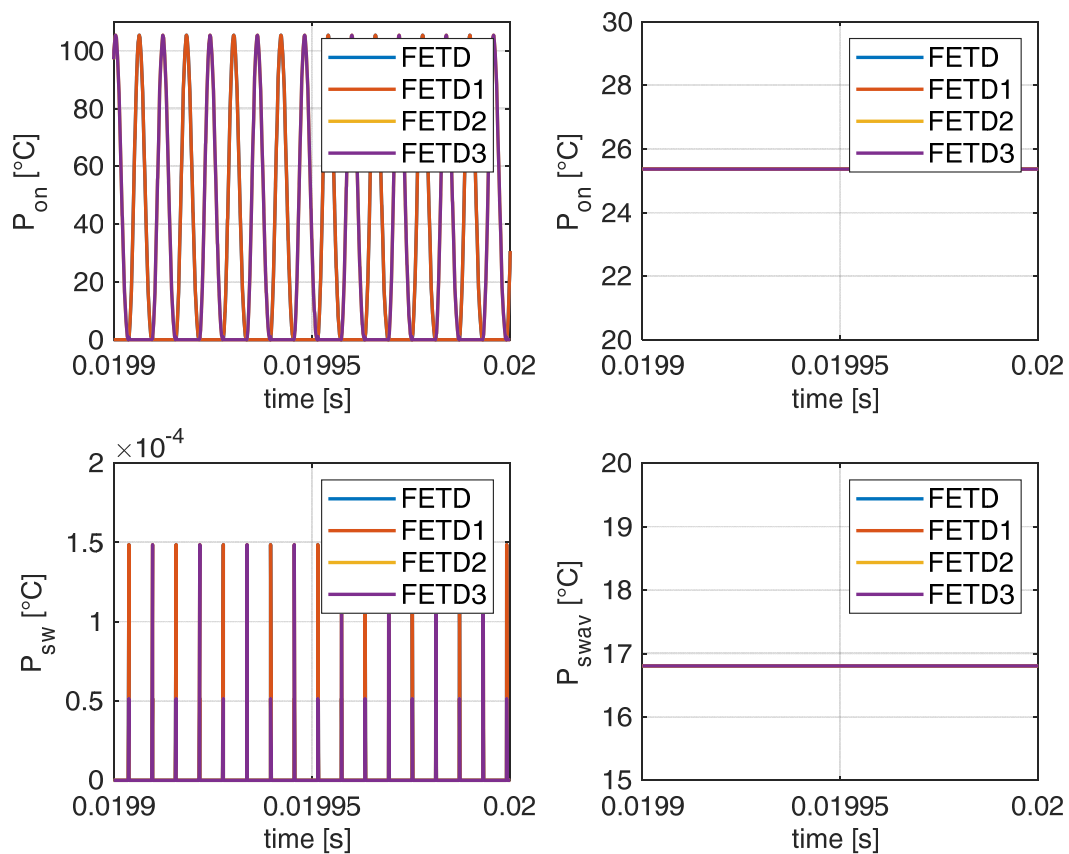


Turn-off losses:

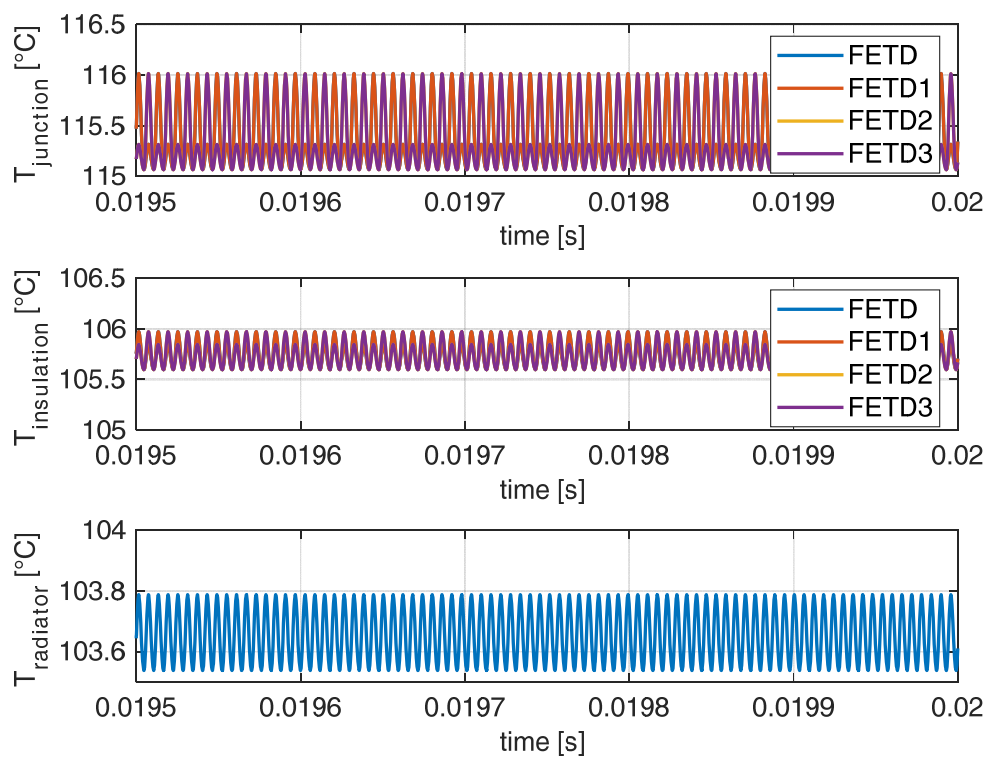


	1
R	0.23 K/W
C	0.5 J/K

Obr. 18 Ztrátový model C2M0045170D – vlevo nahoře: spínací energie, vpravo nahoře: vypínací energie, vlevo dole: vodivostní ztráty, vpravo dole: tepelný řetězec



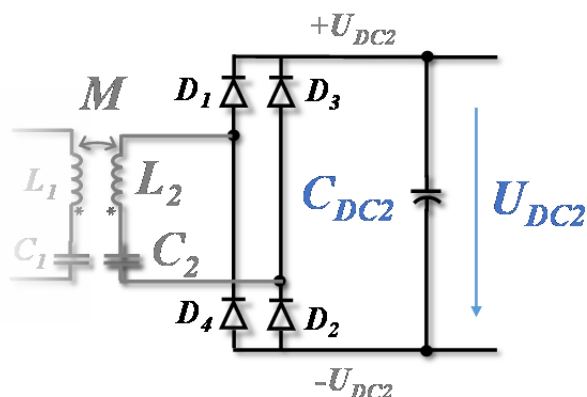
Obr. 19 Výstupy ztrátového modelu jedné fáze DCAC



Obr. 20 Výstup teplot v ustáleném stavu pro jednu fázi DCAC

5.2 Výstupní usměrňovač

Uvažovaná výkonová topologie výstupního usměrňovače (ACDC) je klasická jednofázová můstková s diodami (Obr. 21). Jde tedy o nespínaný usměrňovač. Výkonové prvky jsou uvažovány SiC diody. Výstupní filtrační kapacita představuje jednoduchý filtr zvlnění napětí meziobvodu DC2 (U_{DC2}). Z povahy zdroje usměrňovače v podobě vazebného elementu systému WPT není třeba řešit filtr složitější. Návrh jednotlivých prvků ACDC vychází ze stanovených obvodových parametrů v Tab. II.



Obr. 21 Výkonová topologie ACDC

5.2.1 Návrh kapacity

Návrh velikosti kapacity C_{DC2} je založen na minimalizaci dovoleného zvlnění napětí U_{DC2} při odběru efektivní hodnoty proudu I_{DC2} následujícím blokem (snižující pulzní měnič DCDC) (27). Okamžitý odebíraný proud je hrazen z kapacit DCDC (viz kapitola 6.2).

$$C_{DC2} = \frac{I_{bat\ m}}{\omega_0 \Delta U_{DC2}} \quad (27)$$

Dále je velmi důležité stanovit provozní napětí C_{DC2} . To je možné na základě Tab. II a uvážení bezpečnostního koeficientu 1,4 stanovit na 1700 V.

Potřebné parametry C_{DC2} při zvlnění $\Delta U_{DC2} = 5$ V jsou pro různá jmenovitá napětí akumulátoru (nabíjecí výkon je vždy uvažován 50 kW) shrnuty v Tab. IX. Zvolený kondenzátor pro 50 kW bezdrátovou nabíjecí stanici a jeho parametry zachycuje Tab. X.

Výpočtové parametry jsou ověřeny simulačně.

Tab. IX Parametry C_{DC2}

U_{bat}	$C_{DC2}[\mu F]$	I [A]	U [V]
500	38	100	1700
600	32	84	1700
700	23	72	1700

Tab. X Vybraný kondenzátor C_{DC2} pro 50 kW prototypy

výrobce	TDK
typ	B25690A1387K703
C [μ F]	380
I [A]	100
I_p [kA]	7,1
U [V]	1700
řazení	1S1P
C_c [μ F]	380
I_c [A]	100
I_{pc} [kA]	7,1
U_c [V]	1700

5.2.2 Volba výkonových prvků

Volba výkonových prvků jednofázového, můstkového, neřízeného usměrňovače byla vzhledem k velké frekvenci vstupního napětí v pásmu 85 kHz omezena na SiC a GaN prvky. Nicméně po přihlédnutí k velkým blokovacím napětím až 1700 V (včetně bezpečnostního koeficientu 1,4) byl výběr dále omezen jen na SiC prvky. Tyto byly vybírány u výrobců jako „ROHM“, „Microsemi“ či „Wolfspeed“. Jako nejvíce vhodné pro danou aplikaci se jeví modul jednofázového, diodového, můstkového usměrňovače od „Microsemi“. Parametry jeho dvou variant jsou uvedeny v Tab. XI. Vzhledem k očekávaným proudům 82 A_p (viz. Tab. II) jsou oba uvažované prvky použitelné, nicméně kvůli bezpečnosti v proudu je dále uvažován pouze prvek s poř. č. 2, tedy „Microsemi [MSCDC200H170AG](#)“.

Tab. XI Parametry vybraných prvků ACDC

poř.č.	název	pouzdro	výrobce	U_{AKmax} [V]	I_{AK100} [A]	T_j [°C]	R_{don} [mΩ]	V_f [V]	Q_{rr} [nC]	$R_{th\ j-c}$ [K/V]	á [Kč]
1	MSCDC100H170AG	SP6C	microsemi	1700	100	175	5	0,5	0	0,174	
2	MSCDC200H170AG	SP6C	microsemi	1700	200	175	5	20,5	0	0,092	

Použití SiC prvků zaručuje nízké ztráty a velmi rychlou komutaci. To ve spojení s principiálně měkkou komutací (u vazebných elementů platí $\varphi_{UI} \rightarrow 0$, uvažováno 5% rozladění) vede na minimální výkonové ztráty a nízké oteplení. Proudové zatížení prvků v aplikaci 50kW bezdrátové nabíjecí stanice zachycuje Tab. XII. Střední hodnoty výkonových ztrát na prvcích pak zachycuje Tab. XIII. Střední hodnoty výkonových ztrát jsou stanoveny dle (28, 29).

$$dP_{dav} = V_f I_{AK\ av} + R_{don} I_{AK\ av}^2 \quad (28)$$

$$dP_{rr} = Q_{rr} f_0 U_{AK\ max} \frac{I_{AK\ sw}}{I_{AK100}} \quad (29)$$

Tab. XII Proudové zatížení prvků ACDC

	název	počet paralelních prvků	$I_{AKm\ p}$ [A]	$I_{AKav\ p}$ [A]	$I_{AK\ sw}$ [A]
1	MSCDC100H170AG	2	41	20,5	1,025
2	MSCDC200H170AG	1	82	41	2,05

Tab. XIII Střední výkonové ztráty na prvcích ACDC

	název	$dP_{d\ av}$ [W]	dP_{rr} [W]	dP_{prvek} [W]	$dP_{kombinace}$ [W]
1	MSCDC100H170AG	12,351	→ 0	12,351	24,703
2	MSCDC200H170AG	28,905	→ 0	28,905	28,905

Na základě znalosti středních výkonových ztrát na prvcích je možné stanovit střední teplotu chladiče a čipů těchto prvků při uvažované okolní teplotě $T_a = 60\ ^\circ\text{C}$ a tepelném odporu chladiče $R_{th\ ch-a} = 0,07\ \text{KW}^{-1}$ (viz kapitola 7.2) dle (30, 31). Vypočtené střední teploty shrnuje Tab. XIV.

$$T_{ch} = T_a + 2R_{th\ ch-a} \sum_{i=av,rr} dP_i \quad (30)$$

$$T_j = RT_a + T_{ch} + t_{h\ j-c} \sum_{i=sw,rr} dP_i \quad (31)$$

Tab. XIV Teploty na ACDC

	název	$dP_{av\ ch}$ [W]	T_{ch} [°C]	$T_{j\ av}$ [°C]
1	MSCDC100H170AG	47,405	63,458	65,607
2	MSCDC200H170AG	57,810	64,047	66,706

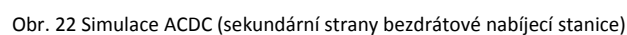
Z dosažených výsledků je patrné možné nasazení zvolených prvků. Zcela potvrdit tepelné poměry na zvolených prvcích je možné jen pomocí tepelného modelu v okamžitých hodnotách, který je uveden v kapitole 5.2.3.

5.2.3 Simulace výstupního usměrňovače

Simulace je provedena v prostředí Matlab – Simulink s pevným krokem simulace $1/f_o/1000$ a diskreditací 5*krok simulace. Při simulaci výstupního usměrňovače bylo přihlíženo k finální koncepci sekundární strany výkonové elektroniky, která spočívá ve společném chladiči pro ACDC a DCDC měnič. Díky této koncepci dochází ke značné miniaturizaci a kompaktnosti sekundární strany, avšak z pohledu tepelných simulací se stávají ACDC a DCDC neoddělitelné. Elektricky (simulace) pochopitelně oddělitelné jsou, avšak je třeba uvážit výpovědi schopnost takovýmto způsobem získaných výsledků.

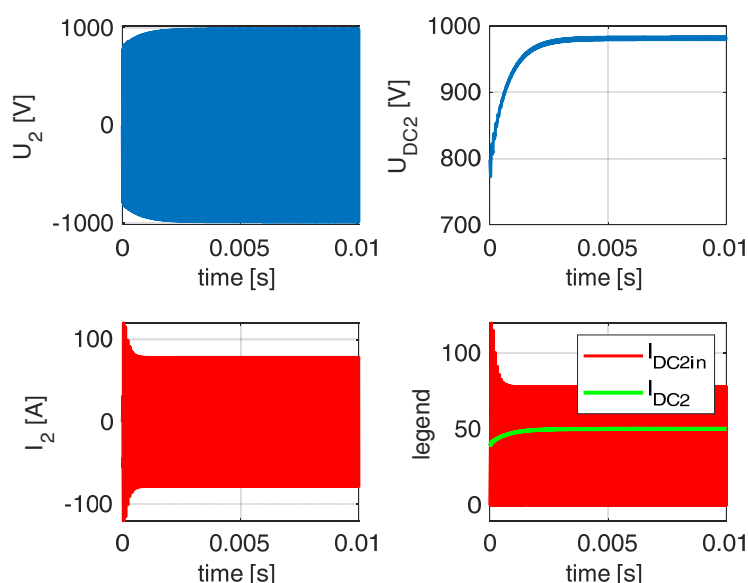
Pro zajištění dobré výpovědi schopnosti je součástí simulace zjednodušený bezdrátový přenos bez regulace na primární straně (Obr. 22 dole). Tento napájí výstupní usměrňovač, který je plnohodnotně simulován a to včetně tepelných simulací (Obr. 22 nahoře). Jak bylo nastíněno v předchozí, z důvodu tepelných simulací je součástí této simulace také část DCDC. Ta je detailněji řešena v kapitole 6.2.

Řízení (Obr. 22 – dva bloky vlevo) je součástí samostatné výzkumné zprávy č. 22190-012-2020. Výkonový obvod s tepelnými simulacemi je uprostřed-nahoře Obr. 22. Pravá horní část Obr. 22 zachycuje vykreslení hodnot a výpočet oteplení v ustálených hodnotách (Matlab fcn.). Detail výkonové části simulace zachycuje Obr. 23. V jeho pravé části je zanesena část ACDC, v pravé části pak DCDC s náhradní zátěží typu baterie. Mezi bloky ACDC a DCDC je provedeno náhradní elektrické spojení respektující regulaci DCDC na ekvivalentní zátěžný odpor. Dolní část Obr. 23 zachycuje tepelné simulace a jejich výstupy do osciloskopů a výpočtu teplot v ustáleném stavu (Matlab fcn. Na Obr. 22).

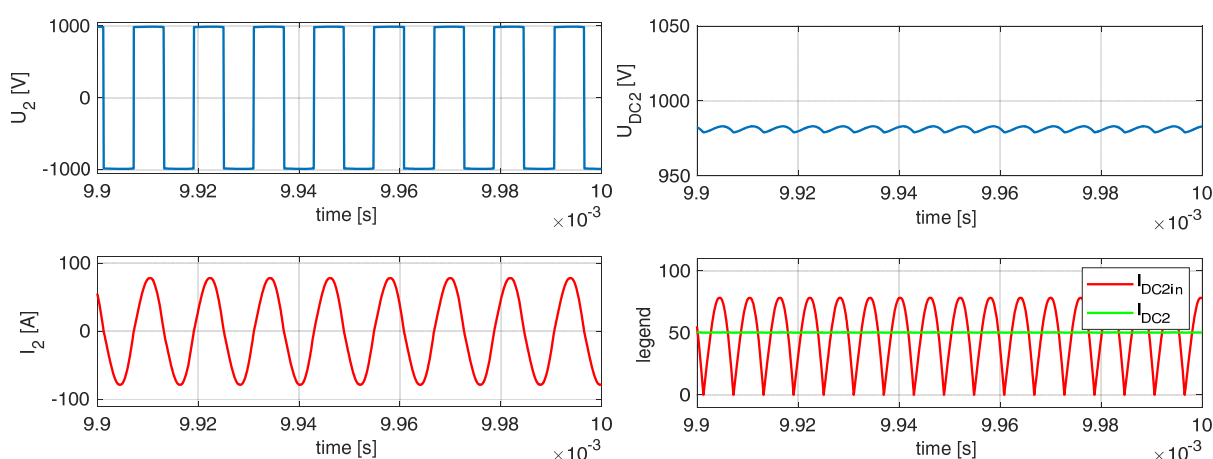


Výsledky simulace elektrických veličin ACDC pro případ 50 kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice jsou uvedeny na Obr. 24. Jeho levá polovina zachycuje napětí U_2 a proud I_2 na vstupu usměrňovače, pravá polovina pak napětí U_{DC2} , proud I_{DC2} na výstupu usměrňovače (za filtrem C_{DC2}) a proud I_{DC2in} před výstupním filtrem. Vše pro start z nenulových počátečních podmínek. Obrázek 25 pak zachycuje detail ustáleného stavu z obr. 24. Ve všech případech je dosahováno dobré shody s výpočty dle Tab. II. Je však třeba přijmout skutečný vliv usměrňovače na napětí U_2 (30) a tedy velikost U_{DC2} a jim příslušné proudy. Poté se teoreticky získané hodnoty výborně shodují s nasimulovanými. Nasimulované proudy pak plně korespondují s výpočty dle Tab. XII a opodstatňují výběr proudově výkonovější varianty z Tab. XI

$$U_{2m-při\ použití\ ACDC} = \frac{4}{\pi} U_{2rms} (= 999,999) \quad (30)$$

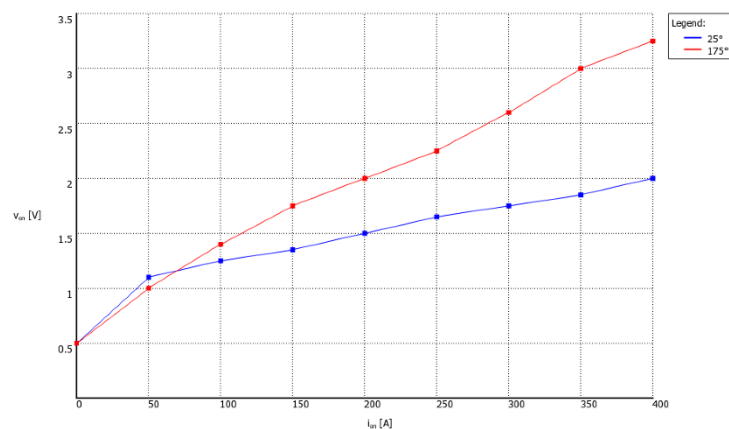


Obr. 24 Elektrické veličiny ACDC ($U_{DC1} = 1000$ V)



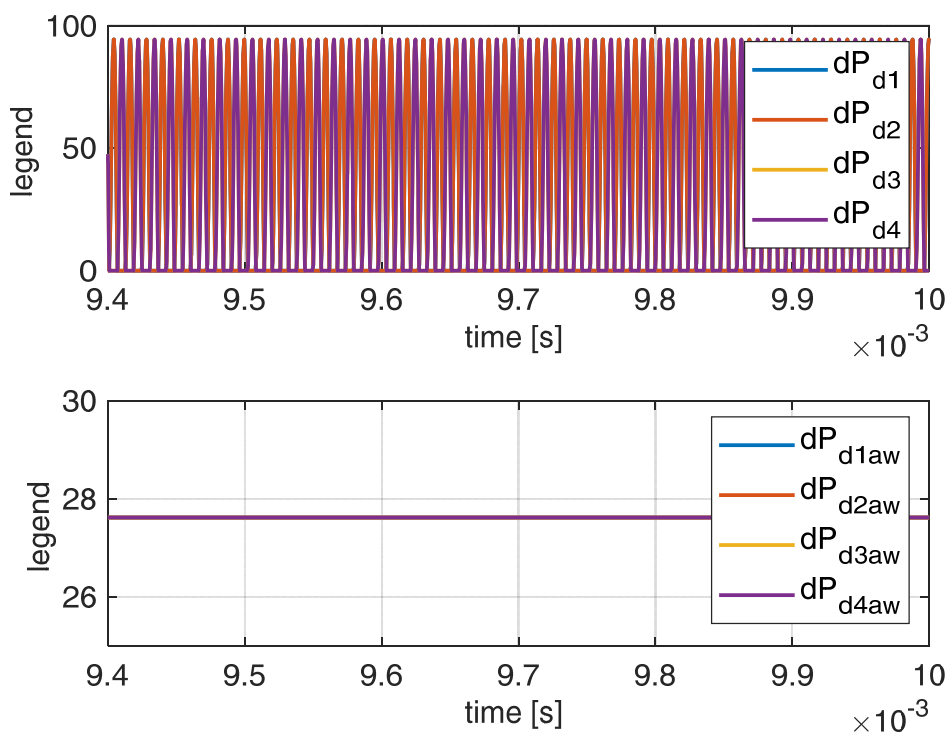
Obr. 25 Elektrické veličiny ACDC – v ustálený stavu ($U_{DC1} = 1000$ V)

Pro potřeby tepelného návrhu a ověření výpočtů oteplení ve středních hodnotách je simulace doplněna o tepelnou část (Obr. 23 dole), která je založena na tepelném modelu použité diody MSCD200H170AG. Tento model je vzhledem k výrobcem udávanému zotavovacímu náboji $Q_{rr} \rightarrow 0$ složen pouze z modelu vodivostních ztrát (Obr. 26). Okamžité výkonové ztráty na prvcích získané z tepelného modelu jsou dále zpracovávány ve smyslu Obr. 23 a 22.



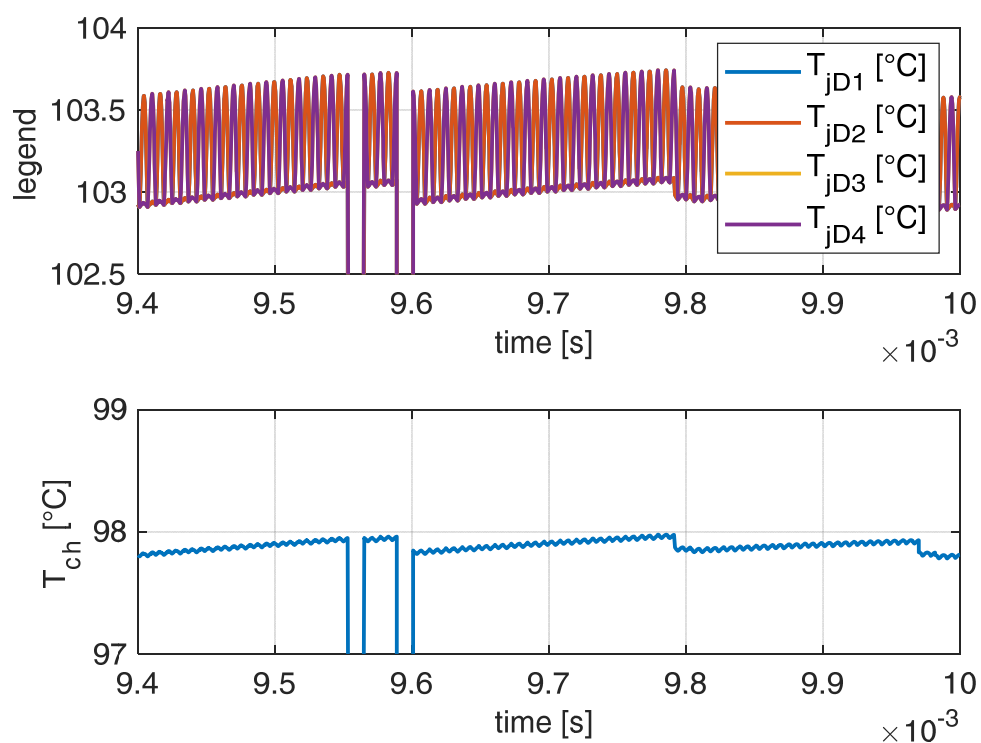
Obr. 26 Tepelný model MSCD200H170AG - vodivostní

Nasimulované výkonové ztráty čipů diod ACDC jsou zachyceny na Obr. 27. V horní části jsou uvedeny okamžité výkonové ztráty, ve spodní pak jejich střední hodnota. Ta vykazuje dobrou shodu s výpočty dle Tab. XIII (rozdíl je daný v simulaci plným respektováním V-A charakteristiky diod dle Obr. 26).



Obr. 27 Výkonové ztráty na prvcích ACDC

Simulované výkonové ztráty jsou dále použity k výpočtu teplot v ustáleném stavu. Zde je třeba připomenout, že ACDC je umístěn na společném chladiči s DCDC měničem a proto se teploty získané simulací a výpočty (dle Tab. XIV) budou lišit. **Tato situace je výpočetně dořešena v kapitole 7.2.** Rozdělovat části ACDC a DCDC simulačně by bylo kontraproduktivní. Obr. 28 tedy zachycuje teploty čipů diod ACDC a chladiče sekundární strany v topologii dle Obr. 23.



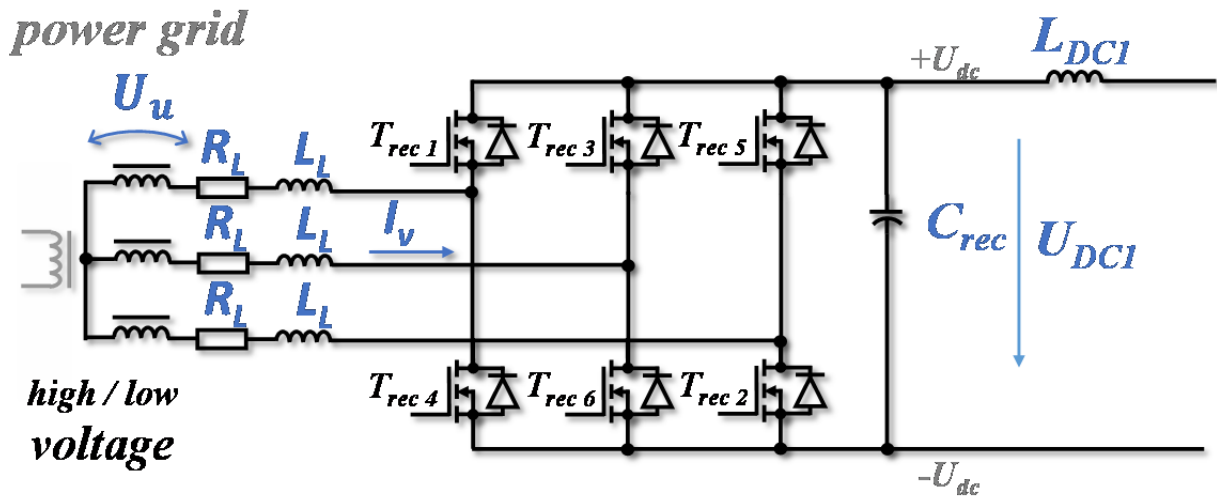
Obr. 28 Teploty čipů ACDC a chladiče sekundární strany (dle topologie z Obr. 23)

6 Návrh výkonových bloků bezdrátové nabíjecí stanice

Výkonovými bloky bezdrátové nabíjecí stanice jsou souhrnně označeny výkonové bloky bezdrátového přenosu výkonu a bloky zprostředkující napájení stanice a nabíjení baterie. Předně se tato kapitola zabývá posledními dvěma jmenovanými bloky, jakožto navazujícími částmi bezdrátového přenosu výkonu. Vstupními hodnotami pro návrh těchto bloků jsou tedy návrhové parametry ACDC a DCAC.

6.1 Síťový napěťový pulzní usměrňovač

Síťový napěťový pulzní usměrňovač (3LNPU) je uvažován v běžné třífázové topologii dle Obr. 29. s napájením ze sítě 3*400 V (3*600 V) a rozsahem výstupního napětí (U_{DC1}) dle Tab. II. Obdobně s předchozími kapitolami je i pro 3LNPU vyžadována vysoká účinnost a vysoká spínací frekvence (zajištění malých rozměrů 3LNPU a minimálního zvlnění odebíraného proudu ze sítě).



Obr. 29 Výkonová topologie 3LNPU

6.1.1 Návrh pasivních prvků

Pasivními prvky 3LNPU se rozumí návrh vstupního a výstupního filtru. Vstupní filtr je složen z indukčností L_L (s respektovaným parazitním odporem R_L). Výstupní filtr je složen z kapacity C_{rec} a indukčnosti L_{DC1} , zároveň je však třeba počítat s příspěvkem C_{inv} (vstupní kapacita střídače) do vzniklého CLC filtru DC1.

Návrh vstupní indukčnosti se řídí (32) s cílem zajistit povolené zvlnění proudu sítě ΔI_{AC} (ΔI_{AC} bylo zvoleno 5 A) při spínacím kmitočtu ω_{3LNPU} (f_{3LNPU} bylo zvoleno 60 kHz) a modulačního indexu mi . Nejnepríznivější stav nastává při regulaci na maximální napětí $U_{DC1max} = 1000$ V. Pro uvedené podmínky vychází $L_L = 384$ μ H.

$$L_L = \sqrt{3} \frac{U_{DC1} \sqrt{\frac{2mi}{\pi} - \frac{mi^2}{2}}}{\omega_{3LNPU} \Delta I_v}, \quad mi = \sqrt{6} \frac{U_{uRMS}}{U_{DC1}} \quad (32)$$

Výstupní filtr pracuje s již stanovenou kapacitou $C_{inv} = 960$ μ F. Prvek C_{rec} se řídí vztahem (33), s cílem omezit zvlnění napětí ΔU_{DC1} na 10 V. C_{rec} poté vychází 150 μ F.

$$C_{rec} = \frac{I_v RMS}{2\pi f_{3LNPU} \Delta U_{DC1}} \approx \frac{P_2}{2\pi f_{3LNPU} U_{DC1max} \Delta U_{DC1}} \quad (33)$$

Posledním pasivním prvkem výstupu 3LNPU je vyhlazovací indukčnost L_{DC1} , jejíž velikost je dána vztahem (17) z kapitoly 5.1. Velikost L_{DC1} pro 50 kW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice vychází 285 nH.

$$L_{DC1} \approx \frac{|\Delta U_{DC1max} - \Delta U_{Cinv}|}{\omega_0 I_{1rms}} \quad (17)$$

Analyticky stanovené velikosti pasivních prvků byly simulačně ověřeny.

Pro dimenzování je také důležité proudové zatížení indukčnosti L_{DC1} , které dle Tab. II činí 82 A_p. Napěťové a proudové zatížení kondenzátoru C_{rec} koresponduje s Tab. II, tedy $U_{Crec} = 1700$ V (při bezpečnostním koeficientu 1,7) a $I_{Crec} = 82$ A_p. Analyticky stanovené napěťové a proudové poměry na prvcích byly kontrolovány pomocí simulace s výsledky: $I_{DC1} = 120$ A_p; $I_{Crec} = 120$ A_p.

Požadované hodnoty pasivních prvků shrnuje Tab. XV. Vybrané pasivní prvky pro 3LNPU v 50 kW prototypu bezdrátové nabíjecí stanice jsou uvedeny v Tab. XVI. V tabulce jsou také uvedeny základní parametry těchto vybraných pasivních prvků. Součástí 3LNPU jsou také spínací kondenzátory, jejichž volba je v Tab. XV také respektována.

Tab. XV Návrhové parametry pasivních prvků 3LNPU

	C_{rec}	C_{sw}		L_{DC1}	L_L
C [mF]	0,15	0,01	L [μF]	285	384
I [A]	82/120	---	I [A]	120	120
U [V]	1700	1700	U [V]	1000	400

Tab. XVI Vybrané pasivní prvky pro 3LNPU

	C_{rec}	C_{sw}		L_{DC1}	L_L
výrobce	TDK	TDK	výrobce	Skybergtech	Skybergtech
typ	B25690A1267K701	B58033I9505M001	typ		
C [mF]	0,26	0,005	L [μF]		
I [A]	80	24	I [A]		
I_p [kA]	3,5		I_p [kA]		
U [V]	1700	900	U [V]		
řazení	1S1P	2S2P	f_n [Hz]		
Cc [mF]	0,26	0,005	---		
Ic[A]	80	48	---		
Ipc [kA]	3,5		---		
Uc[A]	1700	1800	---		

6.1.2 Volba výkonových prvků

Pro 50 kW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice byly pro 3LNPU vybrány prvky dle Tab. XVII. Byly uvažovány jak Si IGBT prvky, tak SiC prvky v diskretním či modulovém pouzdření. Obdobně s již popsánymi bloky, je při výběru velmi limitující blokovací napětí až 1700 V při propustných proudech přes 100 A (viz Tab. XVIII a Tab. II). Roli při výběru hraje také cena prvků a minimalizace výkonových ztrát s cílem dosažení co nejvyšší účinnosti. Při výběru polovodičových prvků je důležité nejen proudové (Tab. XVIII) a napěťové dimenzování, ale také analýza výkonových ztrát (Tab. XIX) a tepelné dimenzování (Tab. XX).

Tab. XVII Parametry uvažovaných výkonových prvků pro 3LNPU

poř.č.	modul	výrobce	pouzdro	VCE [V]	IDnom [A]	Tjm [°C]	VCE0 [V]	Eon [mJ]	Eoff [mJ]	Rth MOS [K/W]	RDS on [mOhm]	VF0 [V]	Rd [mOhm]	Qrr [uC]
1	SKIIP 24GB17E4V1	Semikron	MiniSKiiP II 2	1700	150	175	0,8	26	46	0,28	12	1,2	9	48,8
2	SKIIP 36GB17E4V1	Semikron	MiniSKiiP II 2	1700	200	175	0,8	37	66	0,23	9	1,2	6,8	70
3	CAS300M17BM2	Wolfspeed	62 mm	1700	225	150	0	13	10	0,071	20	0,5	8	4,4
4	BSM250D17P2E004	Rohm	E	1700	250	150	0	22	7	0,15	17	0,5	14	4,4
5	C2M0045170D	Wolfspeed	TO 247-3	1700	48	150	0	2,1	0,86	0,24	90	2	41	0,53
6	C2M0045170P	Wolfspeed	TO 247-4	1700	48	150	0	0,67	0,31	0,24	90	2	41	2
7	MSCMC170AM08CT6LIAG	Microsemi	SP6LI	1700	207	150	0	13,2	9	0,07	15	2	13	3,2

Tab. XVII zachycuje uvažované řazení jednotlivých prvků, maximální a střední proud jedním prvkem ($I_{DSm p}$ a $I_{DSav p}$), střední hodnotu spínaných proudů ($I_{DS sw aw}$) a střední proud zpětnou diodou ($I_{d aw}$).

Tab. XVIII střední hodnoty proudů na prvcích 3LNPU

	název	počet paralelních prvků	$I_{DSm p}$ [A]	$I_{DSav p}$ [A]	$I_{DS sw aw}$ [A]	$I_{d aw}$ [A]
1	SKIIP 24GB17E4V1	1	102,479	59,166	29,583	0,000
2	SKIIP 36GB17E4V1	1	102,479	59,166	29,583	0,000
3	CAS300M17BM2	1	102,479	59,166	29,583	0,000
4	BSM250D17P2E004	1	102,479	59,166	29,583	0,000
5	C2M0045170D	3	34,160	19,722	9,861	0,000
6	C2M0045170P	3	34,160	19,722	9,861	0,000
7	MSCMC170AM08CT6LIAG	1	102,479	59,166	29,583	0,000

Při znalosti středních proudů prvky je možné stanovit jejich střední výkonové ztráty dle analogie s (18 - 22). Tab. XIX zachycuje střední propustné výkonové ztráty na spínacím prvku ($dP_{on av}$) a střední spínací ztráty ($dP_{sw av}$). Ztráty vedením ($dP_d av$) a komutací ($dP_{rr av}$) na zpětných diodách jsou nulové pro nulový střední proud těmito diodami. V Tab XIX jsou také zaneseny celkové střední výkonové ztráty na jednom prvku paralelní kombinace a celkové střední ztráty na této paralelní kombinaci.

Tab. XIX Střední výkonové ztráty na prvcích 3LNPU

	název	$dP_{on\ av}$ [W]	dP_{sw} [W]	$dP_{d\ av}$ [W]	dP_{rr} [W]	dP_{prvek} [W]	$dP_{kombinace}$ [W]
1	SKIIP 24GB17E4V1	123,991	851,996	0,000	0,000	975,988	975,988
2	SKIIP 36GB17E4V1	113,489	914,121	0,000	0,000	1027,611	1027,611
3	CAS300M17BM2	70,013	181,444	0,000	0,000	251,457	251,457
4	BSM250D17P2E004	59,511	205,899	0,000	0,000	265,410	265,410
5	C2M0045170D	35,007	36,486	0,000	0,000	71,493	214,478
6	C2M0045170P	35,007	12,080	0,000	0,000	47,086	141,259
7	MSCMC170AM08CT6LIAG	52,510	190,362	0,000	0,000	242,871	242,871

Na základě znalosti středních výkonových ztrát je možné stanovit střední teplotu na chladiči T_{ch} s uvažovaným tepelným odporem $R_{th\ cha} = 0,12$ (viz kapitola 7) a střední teplotu čipů uvažovaných výkonových prvků T_j . Celkový střední ztrátový výkon odváděný chladičem je značen $dP_{av\ ch}$.

Tab. XX Střední teploty pro 3LNPU

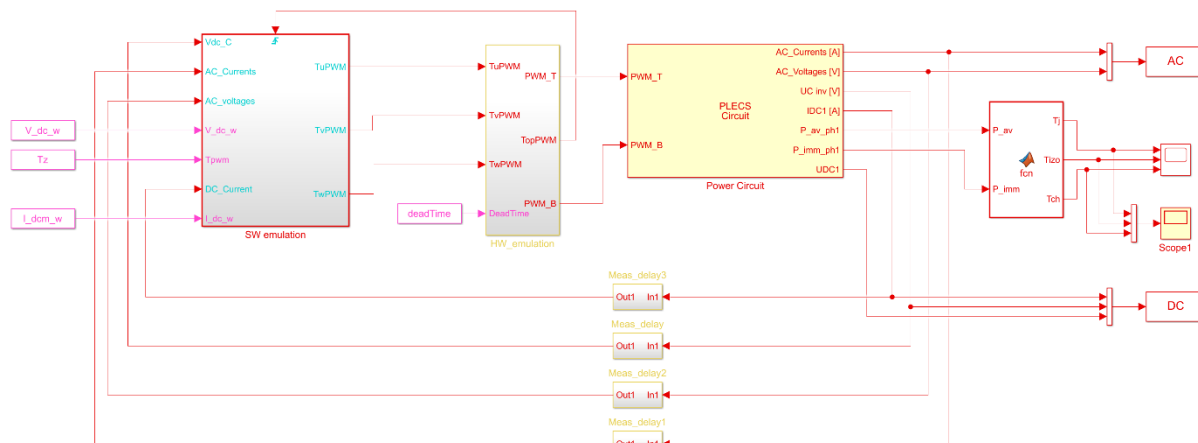
	název	$dP_{av\ ch}$ [W]	T_{ch} [W]	T_j [°C]
1	SKIIP 24GB17E4V1	1951,976	294,237	616,313
2	SKIIP 36GB17E4V1	2055,221	306,627	594,357
3	CAS300M17BM2	502,914	120,350	150,776
4	BSM250D17P2E004	530,821	123,699	176,781
5	C2M0045170D	428,956	111,475	132,208
6	C2M0045170P	282,519	93,902	107,557
7	MSCMC170AM08CT6LIAG	485,743	118,289	147,434

Na základě dosahovaných středních hodnot teplot čipů je možné vyloučit prvky s poř.č. 1, 2, 3, 4. Na základě porovnání cen (celková cena za 3LNPU při použití poř.č. 7 $\approx$ 60000 Kč proti poř.č. 5,6 $\approx$ 36000 Kč) je pak možné označit paralelní řazení prvku s poř.č. 5,6 za nejvhodnější. Dále je pro 3LNPU uvažován SiC MOSFET „Wolfspeed [C2M0045170P](#)“ a to především z důvodu získání dostatečné rezervy tepelného návrhu při zachování „malého“ chladiče – viz kapitola 6.1.3.

Pro finální výběr prvků je tedy velmi důležité tepelné dimenzování v okamžitých hodnotách. To bylo provedeno na základě tepelné simulace v prostředí Simulink – Plecs

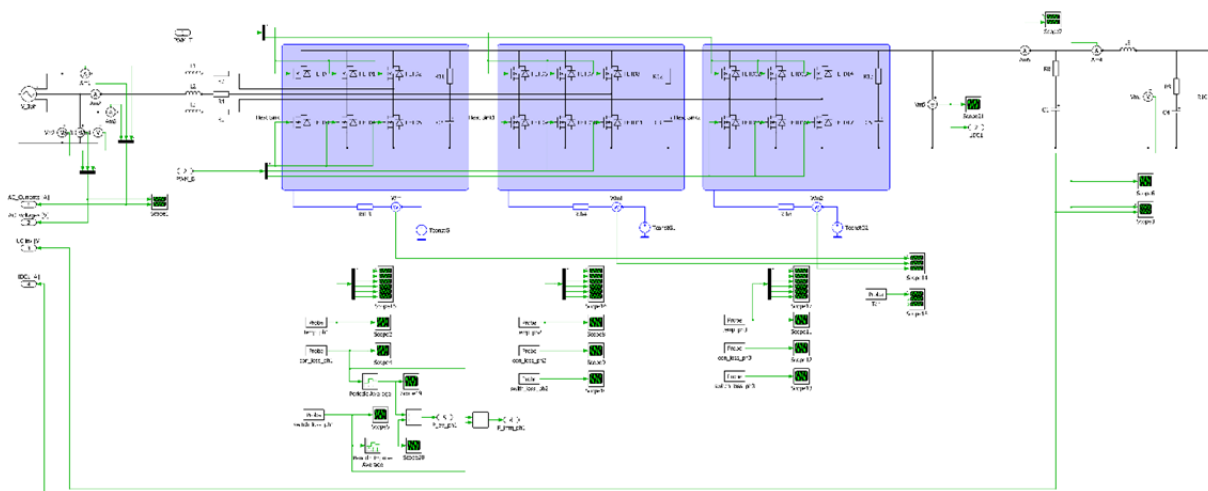
6.1.3 Simulace 3LNPU

Simulace 3LNPU je realizována v prostředí Matlab – Simulink v podobě dle Obr. 30. Bloky řízení (levá a spodní část Obr. 30) jsou předmětem samostatné výzkumné zprávy č. 22190-012-2020. Detail výkonové části (blok Plecs) je uveden na Obr. 31. Pravá část Obr. 30 pak zachycuje vykreslení měřených veličin a výpočet okamžitých teplot v ustáleném stavu.



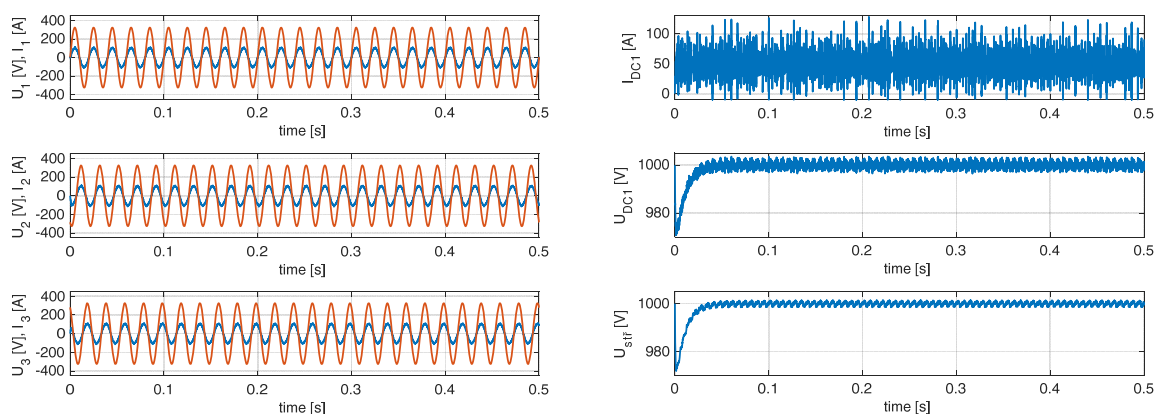
Obr. 30 Simulační schéma 3LNPU

Obr. 31 zachycuje nejen detail výkonového obvodu a uvažovanou topologii konstrukce (pro každou fázi oddělený chladič) ale také tepelnou simulaci (spodní část). Jako zátěž je v simulaci uvažován ekvivalentní odpor. Pro úplnou korektnost výsledků simulace je třeba použít jako zátěž střídač – viz. kapitola 7.1.



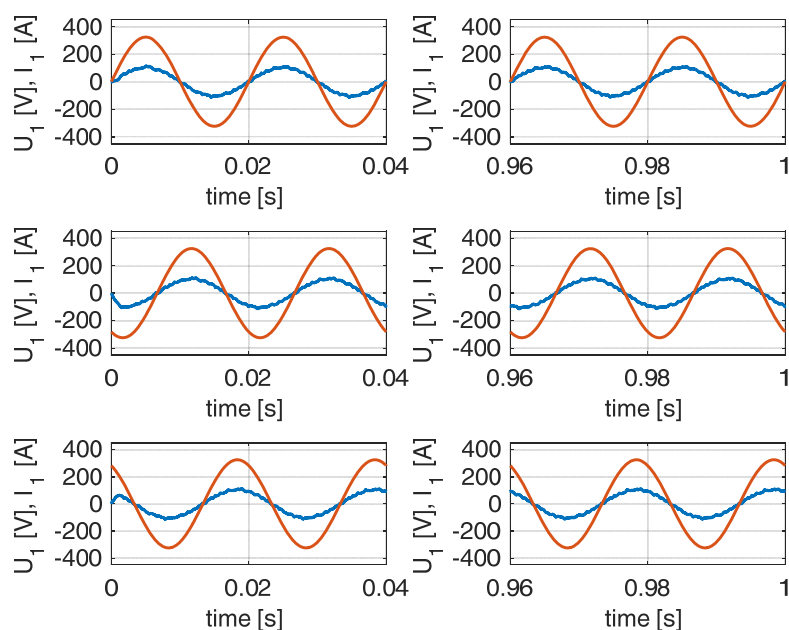
Obr. 31 Simulační schéma výkonové části 3LNPU

Výsledky elektrické části simulace jsou zachyceny na následujících obrázcích. Celkový přehled poskytuje Obr. 32, který ve své levé části zachycuje napětí a proudy sítě 3*400 V při regulaci na $U_{DC1} = 1000$ V s požadavkem $\phi_{U1} = 0$. V pravé části Obr. 32 je zachycen celkový pohled na výstupní část 3LNPU ze kterého je patrný start z nenulových počátečních podmínek a rychlá, přesná regulace U_{DC1} .

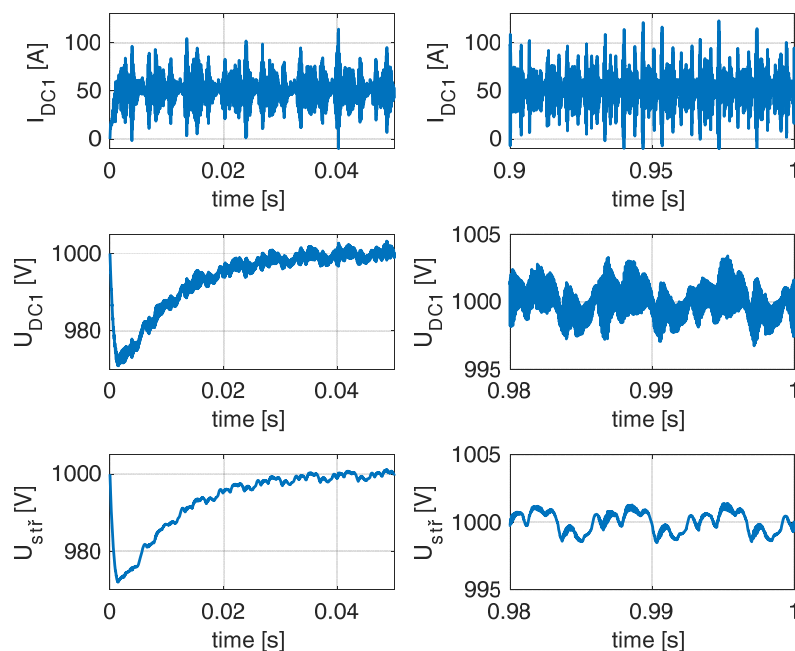


Obr. 32 Elektrické veličiny 3LNPU – vlevo: napájecí část, vpravo: výstupní část

Detail elektrických veličin je uveden na Obr. 33 a 34 zprostředkovává možnost kontroly kvality regulace, hodnot obvodových veličin a správnost návrhu pasivních prvků. Z Obr. 33 je dobře patrné $\varphi_{U_I} = 0$ a splnění stanoveného ΔI_V . Z Obr. 34 je dobře patrné splnění stanovených zvlnění ΔU_{DC1} a $\Delta U_{stř}$ v ustáleném i přechodném stavu.



Obr. 33 Elektrické veličiny 3LNPU – detail vstupní části



Obr. 34 Elektrické veličiny 3LNPU - Detail výstupní části

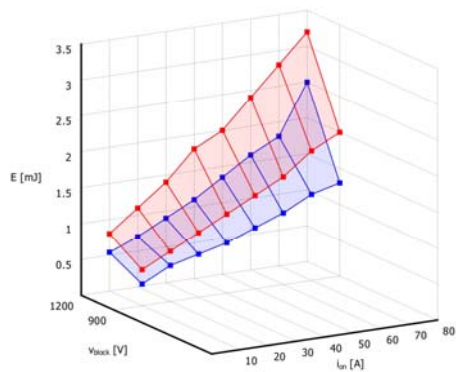
Tepelná simulace je založena na tepelném modelu zvolených spínacích prvků. Rozdíl je zde však v možném výskytu proudů zpětnými diodami (simulační kontrolou vyloučeny po přednabití meziobvodu DC1). Vytvořený tepelný model prvků [C2M0045170P](#) (kapitola 5.1.3) byl pro přesnost také ztotožněn s tepelným modelem výrobce (Obr. 35) dostupným z internetových stránek: <http://go.wolfspeed.com/all-models> (poznámka: přes odkaz na: <https://www.plexim.com/plecs/thermal>). Vytvořený tepelný model je uveden na Obr. 35. Při porovnání vytvořeného modelu a modelu výrobce jsou zřejmé jen malé odlišnosti, které lze zanedbat. Byly také provedeny srovnávací simulační testy, kde výkonové ztráty vycházejí prakticky stejně a je tedy možné dále problém modelovat „zjednodušeně“ pomocí vlastního modelu.

Simulované výkonové ztráty jsou dále zpracovávány ve smyslu Obr. 31 a je z nich vypočteno oteplení v okamžitých hodnotách pro ustálený stav pomocí Matlab funkce z Obr. 30.

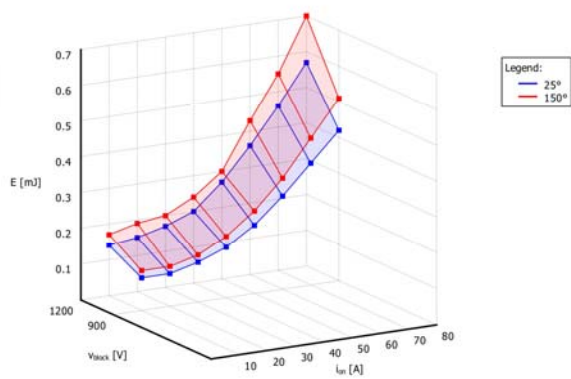
Výsledky tepelné simulace jsou uvedeny na Obr. 36 a 37. První z nich (Obr. 36) zachycuje modelované výkonové ztráty v okamžitých a středních hodnotách. U středních hodnot vodivostních ztrát je dosaženo výborné shody s analytickými výpočty (dle Tab. XIX). Mezi nasimulovanými a vypočtenými hodnotami středních spínacích ztrát je dosaženo rozdílu přibližně 10 W (u simulace vyšší hodnoty) z důvodu nepřesnosti analytických výpočtů (středního spínaného proudu). Obr. 37 zachycuje okamžité teploty na čipech (T_j), izolačních podložkách (T_{izo}) a chladiči (T_{ch}) v ustáleném stavu. Zde je patrná dobrá shoda s analytickými výpočty (pouze s rozdílem pramenícím z rozdílu velikosti spínacích ztrát). Simulace je ve smyslu Obr. 31 provedena jen pro fázi U 3LNPU.

Simulace i analytické výpočty zahrnují keramické izolační podložky o $R_{th} = 0,05$.

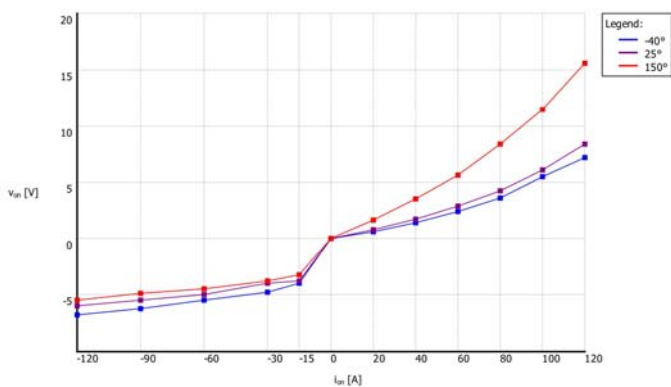
Turn-on losses:



Turn-off losses:

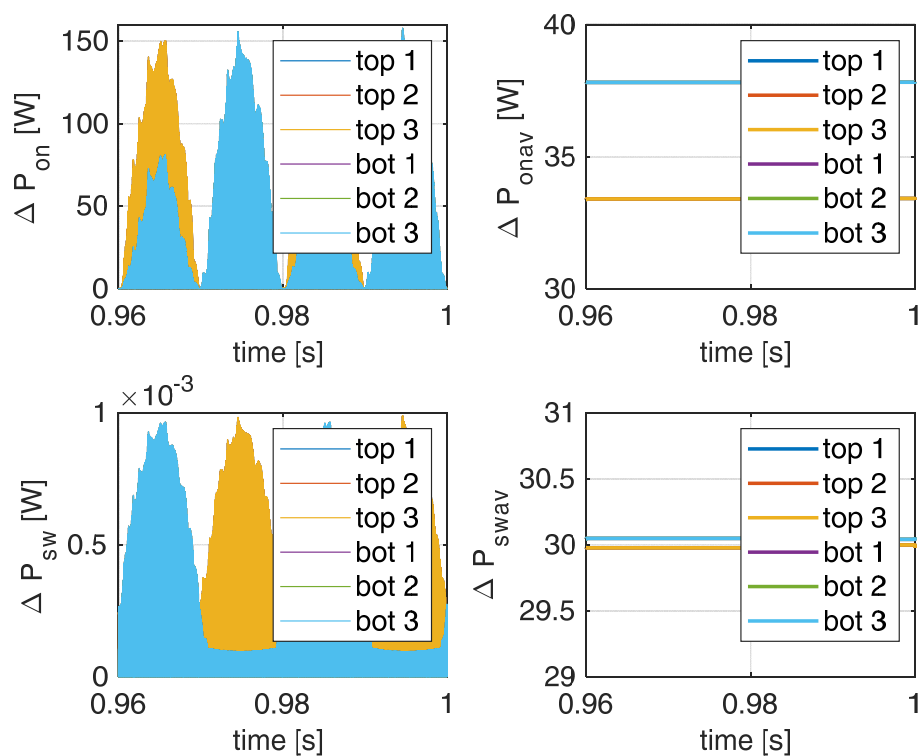


Conduction losses:

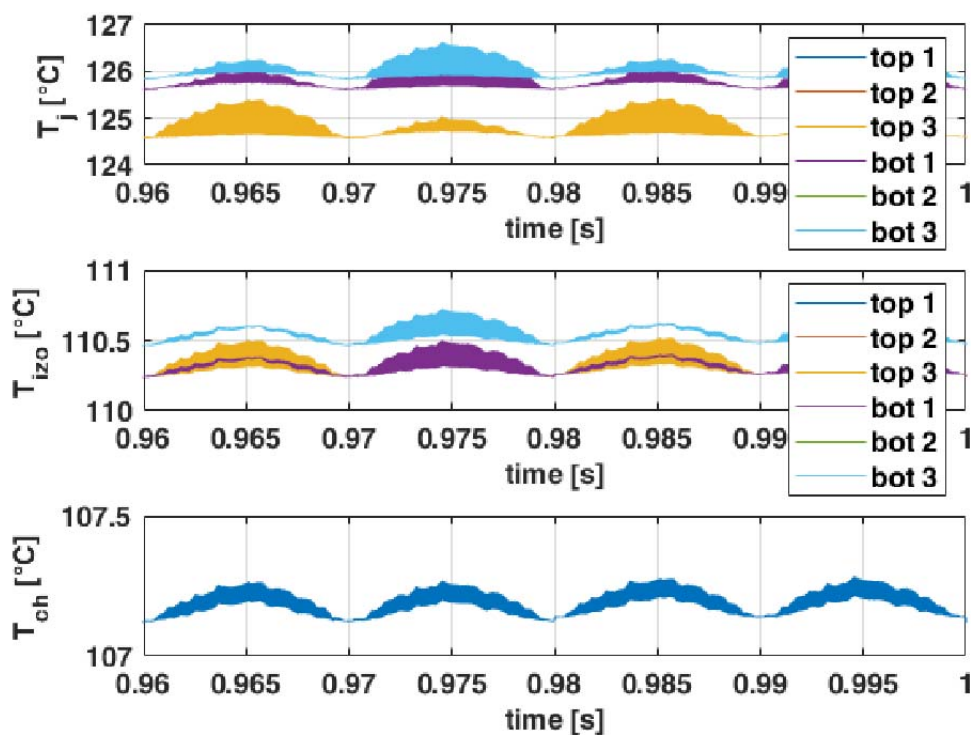


	1
R	0.23 K/W
C	0.5 J/K

Obr. 35 Tepelný model výrobce pro C2M0045170P – vlevo nahoře: E_{on} , vpravo nahoře: E_{off} , vlevo uprostřed: vodivostní ztráty MOSFET, vpravo uprostřed: vodivostní ztráty zpětné diody, dole: model přestupu tepla z čipu na pouzdro.



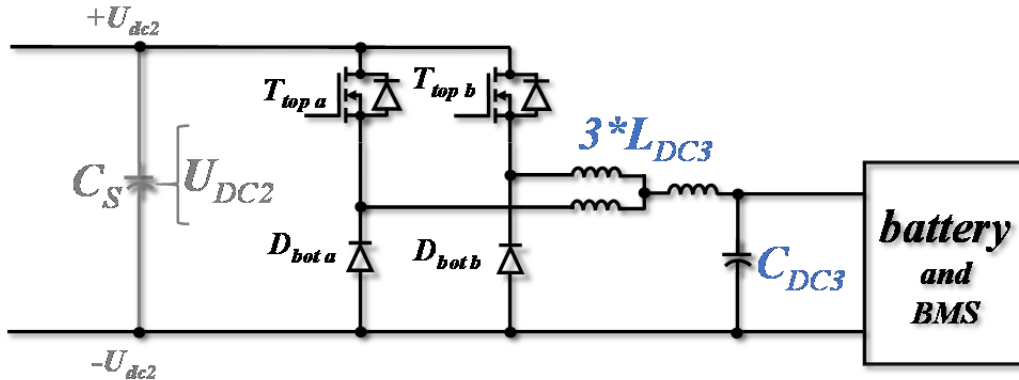
Obr. 36 Výkonové ztráty na prvcích 3LNPU



Obr. 37 Teploty na 3LNPU

6.2 DCDC měnič v režimu pulzního měniče odporu

Konec řetězce bezdrátové nabíjecí stanice snižující DCDC měnič v režimu zvyšujícího pulzního měniče odporu. S ohledem na velký nabíjecí výkon až 50 kW při napětí baterie U_{DC3} 500 a více volt (proud baterie I_{DC3} až 100 A) je zvolena dvoufázová topologie DCDC měniče s přesazeným řízením bez mezifázového transformátoru (Obr. 38). Tato topologie umožňuje dosažení nižšího zvlnění proudu baterie a vyšší účinnosti. Obr. 38 také zachycuje návaznost na blok ACDC z kapitoly 5.2.



Obr. 38 Schéma silové části DCDC

6.2.1 Návrh pasivních součástek

Mezi pasivní součástky DCDC patří filtrační indukčnosti L_{DC3} (34) a vyhlazovací kondenzátor C_{DC3} (35). Návrh indukčnosti L_{DC3} vychází z omezení zvlnění nabíjecího proudu baterie ΔI_{DC3} na stanovenou hodnotu (5 A) při konstantní spínací frekvenci DCDC měniče f_{DCDC} (60 kHz) a napájecím napětí DCDC měniče U_{DC2} (až 1000 V). Nejhorší případ nastává při poměrném sepnutí $s = 0,5$, což je také pro (34) uvažováno. Výpočet vyhlazovacího kondenzátoru vychází z omezení vzniku rezonančních stavů na meziobvodu DC3 bez připojené baterie.

$$L_{DC3} = \frac{1}{2} s (1 - s) \frac{U_{DC2}}{2f_{DCDC} \Delta I_{DC3}} \quad (34)$$

$$C_{DC3} \geq \frac{1}{\left(\frac{\omega_{DCDC}}{2}\right)^2 L_{DC3}} \quad (35)$$

Pro 50 kW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice činí L_{DC3} 100 μH a C_{DC3} minimálně 135 μF .

Součástí dimenzování pasivních prvků DCDC měniče je také proudové a napěťové namáhání. Proud kondenzátorem je velmi malý, vyrovnávacího charakteru, napětí na kondenzátoru je při bezpečnostním koeficientu 1,2 povolené 1200 V. Proud indukčností tvoří plný nabíjecí proud, tedy až 100 A. Základní požadované parametry na pasivní prvky DCDC shrnuje Tab. XXI. Tab. XXII poté zachycuje vybrané pasivní prvky a jejich parametry.

Tab. XXI Stanovené parametry pasivních prvků DCDC

	C_{DC3}	L_{DC3}
C [μ F]/ L [μ H]	135	100
I [A]	0	100
U [V]	1200	

Tab. XXII Parametry zvolených pasivních prvků DCDC

	C_{DC3}		L_{DC3}
výrobce	TDK	výrobce	Skybergetech
typ	B25620B1127K201	typ	
C [μ F]	120	L [μ H]	
I [A]	50	I [A]	
I _p [kA]		I _p [kA]	
U [V]	1200	U [V]	
řazení	1S1P	řazení	
C _c [μ F]	120	L _{μ} [uH]	
I _c [A]	50	I _c [A]	
I _{pc} [kA]		I _{pc} [kA]	
U _c [V]	1200	U _c [V]	

6.2.2 Volba výkonových prvků

Jako výkonové prvky (tranzistory T_{top} a diody D_{bot}) byli uvažovány SiC MOSFET tranzistory (poř. č. 1 až 4) a SiC diody pro kombinaci s prvky s poř. č. 1 a 2 (poř. č. D1). Prvky s poř. č. 3 a 4 externí diodu nevyžadují, jedná se o moduly v provedení „phase leg“. Uvažované výkonové prvky a jejich základní parametry jsou uvedeny v Tab. XXIII.

Tab. XXIII Parametry uvažovaných výkonových prvků DCDC

poř.č.	název	pouzdro	výrobce	U_{DSmax} [V]	I_{DS100} [A]	T_j [°C]	E_{on} [mJ]	E_{off} [mJ]	R_{DSon} [mOhm]	V_d [V]	Q_{rr} [nC]	R_{th-j-c} [K/W]	α [Kč]
1	C2M0045170D	TO247-3	Wolfspeed	1700	48	150	2,1	0,86	90	4,1	530	0,24	2013
2	C2M0045170P	TO247-4	Wolfspeed	1700	48	150	0,67	0,31	90	4,1	2000	0,24	1846
3	BSM250D17P2E004	E	ROHM	1700	225	150	22	7	17	1,8	4,4	0,083	21000
4	CAS300M17BM2	62mm	Wolfspeed	1700	225	150	13	10	20	2,5	4,4	0,065	19726

poř.č.	název	pouzdro	výrobce	U_{AKmax} [V]	I_{AK100} [A]	T_j [°C]	U_d [V]	R_d [mOhm]	Q_{rr} [nC]	R_{th} [°C/W]
D1	MSC050SDA017B	TO247	Microsemi	1700	51	175	0,5	36	0	0,2

Následující Tab. XXIV zachycuje proudové zatížení jednotlivých prvků (maximální proud prvkem $I_{DSm p} / I_{AK p}$, střední proud prvků $I_{DSav p} / I_{AKav p}$ a spínaný proud $I_{DS sw} / I_{AK sw}$) a jejich potřebnou paralelizaci. Na základě znalosti proudového zatížení je možné stanovit střední výkonové ztráty jednotlivých prvků (vodivostní $dP_{on av} / dP_{d av}$, spínací $dP_{sw av} / dP_{rr}$ a ztráty zpětných diod) (Tab. XXV). Na základě celkových středních ztrát prvků ($dP_{prvek av}$) a celkových středních ztrát na paralelních kombinacích ($dP_{kombinace av}$) je možné analyticky stanovit střední teplotu chladiče (T_{ch}) a čipů součástek ($T_{j(MOS)} / T_{j(D1)}$). Ty jsou spolu se středním ztrátovým výkonem odváděným chladičem ($dP_{av ch}$) uvedeny v Tab. XXVI. Výpočty středních ztrát se řídí analogií s (18 - 21). Výpočty středních teplot jsou provedeny z náhradního tepelného

schématu při respektování keramických izolačních podložek ($R_{th} = 0,05$) u prvků s poř. č. 1 a 2. Teplota okolí je uvažována 60 °C a tepelný odpor chladiče $R_{ch} = 0,07 \text{ KW}^{-1}$ (viz kapitola 7.2).

Tab. XXIV Proudové zatížení prvků DCDC

	název	počet paralelních prvků	$I_{DSm\ p}$ [A]	$I_{DSav\ p}$ [A]	$I_{DS\ sw}$ [A]
1	C2M0045170D	2	32,5	16,25	32,5
2	C2M0045170P	2	32,5	16,25	32,5
3	BSM250D17P2E004	1	65	65	65
4	CAS300M17BM2	1	65	65	65

	název	počet paralelních prvků	$I_{AKm\ p}$ [A]	$I_{AKav\ p}$ [A]	$I_{AK\ sw}$ [A]
D1	MSC050SDA017B	2	32,5	16,25	32,5

Tab. XXV Střední výkonové ztráty prvků DCDC

	název	$dP_{on\ av}$ [W]	$dP_{sw\ av}$ [W]	$dP_d\ av$ [W]	$dP_{rr\ av}$ [W]	$dP_{prvek\ av}$ [W]	$dP_{kombinace\ av}$ [W]
1	C2M0045170D	23,766	170,354	0,000	0,000	194,120	388,240
2	C2M0045170P	23,766	56,401	0,000	0,000	80,167	160,333
3	BSM250D17P2E004	71,825	712,111	0,000	0,000	783,936	783,936
4	CAS300M17BM2	84,500	564,778	0,000	0,000	649,278	649,278

	název	$dP_d\ av$ [W]	dP_{rr} [W]	$dP_{prvek\ av}$ [W]	$dP_{kombinace\ av}$ [W]
D1	MSC050SDA017B	17,631	0,000	17,631	35,263

Tab. XXVI Střední teploty na prvcích DCDC

	název	$dP_{av\ ch}$ [W]	T_{ch} [W]	T_j (MOS) [°C]	T_j (D1) [°C]
1	C2M0045170D	847,004	119,290	173,644	127,753
2	C2M0045170P	391,192	87,383	109,830	95,846
3	BSM250D17P2E004	1638,397	174,688	239,755	xxx
4	CAS300M17BM2	1369,081	155,836	198,039	xxx

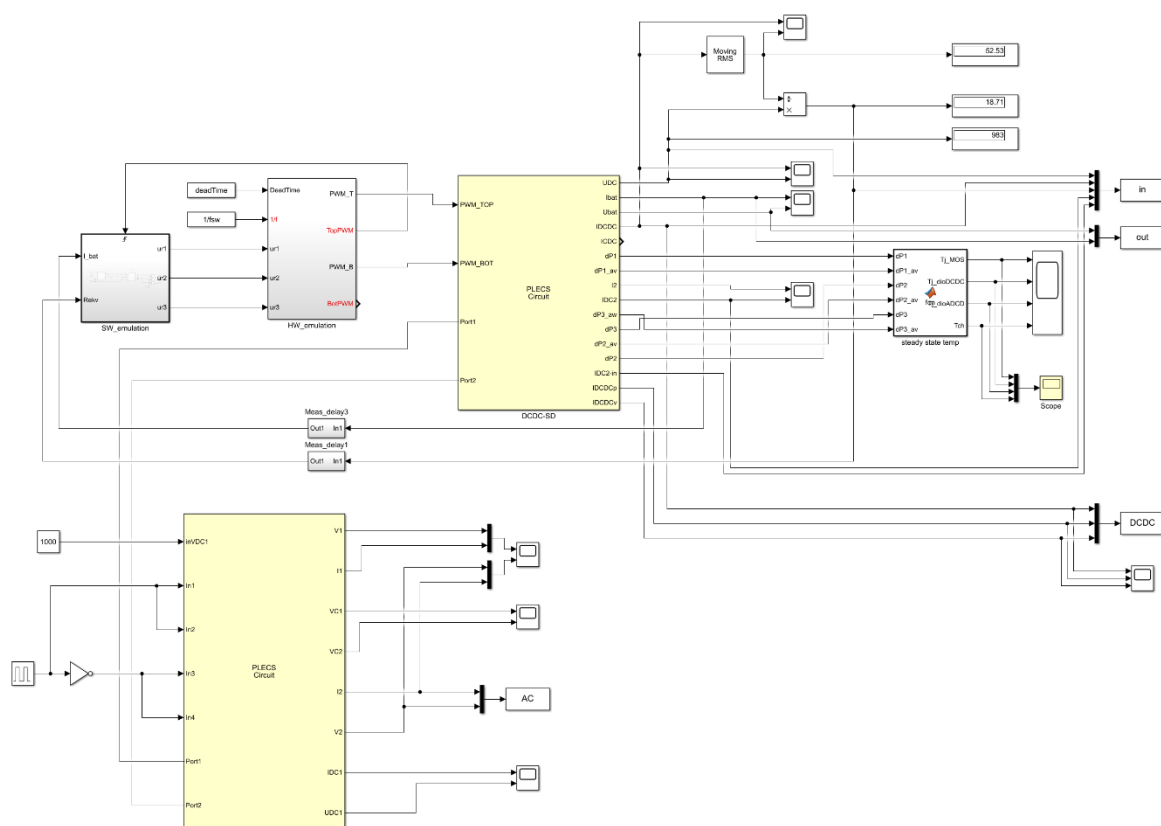
Na základě získaných hodnot je možné vyloučit prvky s poř. č. 3 a 4 pro neúnosné spínací ztráty. Prvky s poř. č. 1 a 2 jsou spolu s diodou (D1) pro aplikaci v DCDC vhodné. Je však třeba zohlednit uvažovanou topologii sekundární části polovodičových měničů, tedy uložení ACDC a DCDC na společný chladič o $R_{th} = 0,07 \text{ KW}^{-1}$ (Viz kapitola 7.2). To limituje možný výběr na tranzistory „Wolfspeed [C2M0045170P](#)“ a diody „Microsemi [MSC050SDA017B](#)“.

Pro finální ověření vhodnosti vybraných prvků je provedena tepelná simulace v okamžitých hodnotách, která je součástí simulace DCDC v následující kapitole.

6.2.3 Simulace DCDC

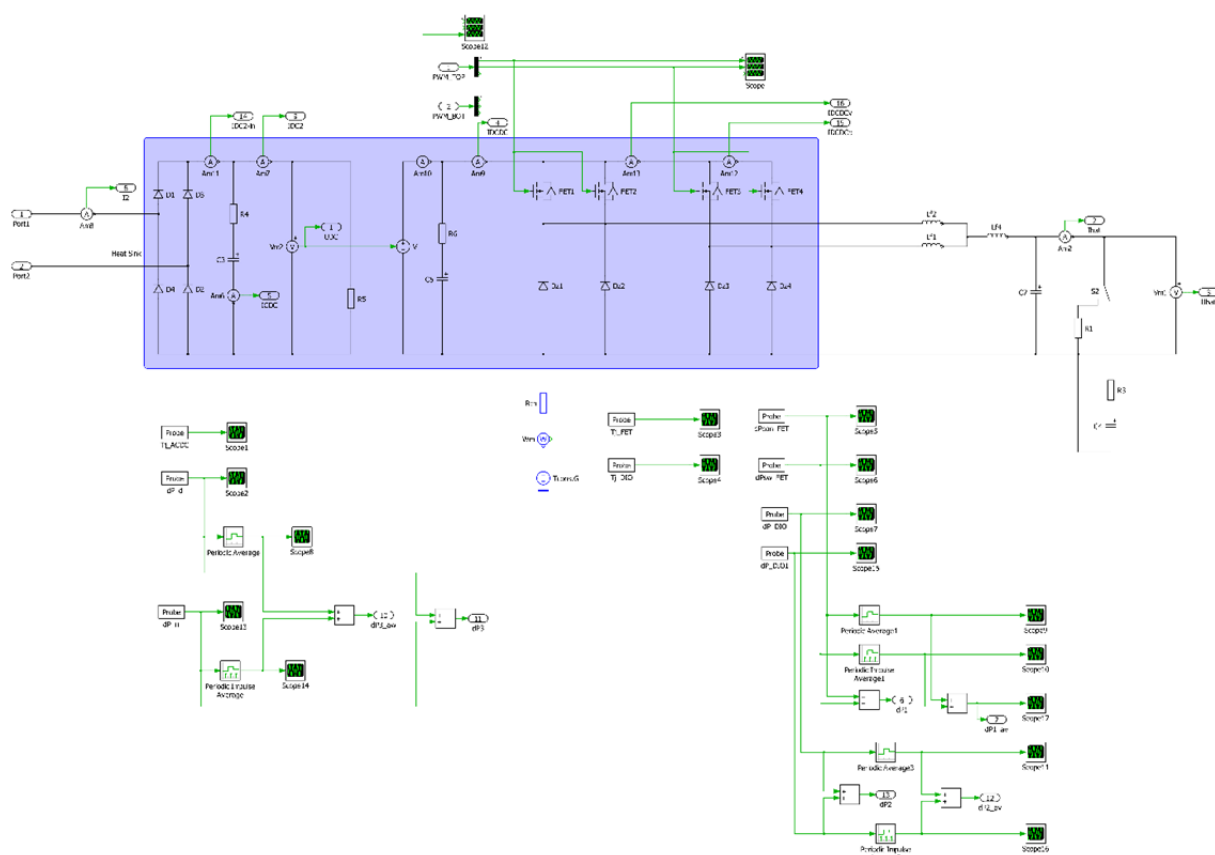
Simulace DCDC měniče je realizována v prostřední Matlab – Simulink dle simulačního schéma z Obr. 39. Bloky vlevo nahoře představují bloky řízení, které jsou předmětem samostatné výzkumné zprávy 22190-012-2020. Nahoře uprostřed je umístěn blok silového obvodu DCDC měniče (viz Obr. 40), který je blíže popsán v dalším odstavci. Vpravo nahoře jsou umístěny bloky vykreslení a dopočtu okamžitých teplot prvků v ustáleném stavu.

Z důvodu výpovědi schopnosti výsledků je simulace DCDC měniče neoddelitelná od bloku ACDC a to jak z pohledu regulačního, tak silového. Spodní polovina Obr. 39 zachycuje ořezanou část vazebných elementů, které napájí zmíněný blok ACDC. Simulace napájení ACDC vazebnými elementy je opět důležitá pro výpovědi schopnost výsledků. V dalším popisu simulace DCDC je část DCDC od ostatních zmíněných co nejvíce separována. Kompletně se simulací sekundární strany bezdrátové nabíjecí stanice zabývá kapitola 7.2.



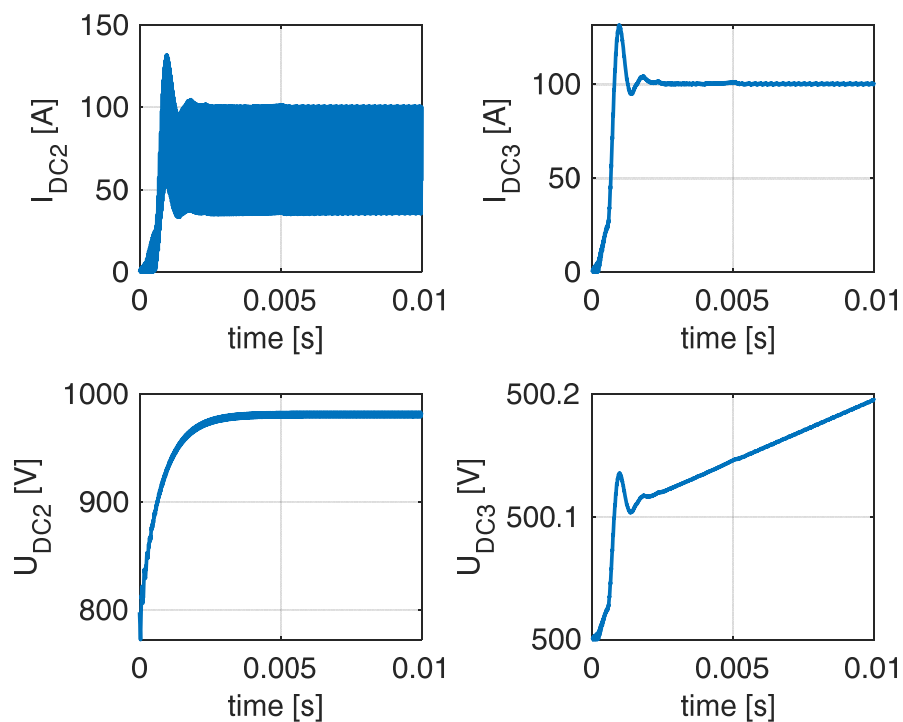
Obr. 39 Simulační schéma DCDC

Obr. 40 zachycuje silovou část simulace DCDC (nahore uprostřed), jak bylo zmíněno, ve spojení s ACDC napájeným vazebnými elementy (nahore vlevo). Zátěž DCDC tvoří náhradní zapojení baterie v maximálním možném zjednodušení, tedy sériový EC článek o velké kapacitě a malém odporu (Obr. 40 nahore vpravo). Spodní část Obr. 40 zachycuje tepelnou část simulace DCDC a ACDC na společném chladiči (detailněji popsáno níže).

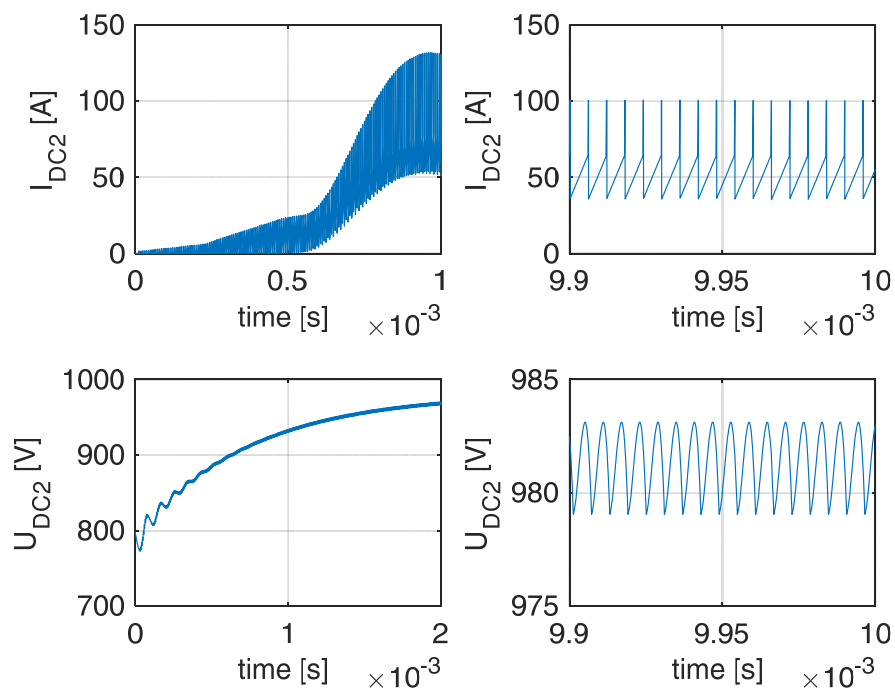


Obr. 40 Simulační schéma výkonové části DCDC

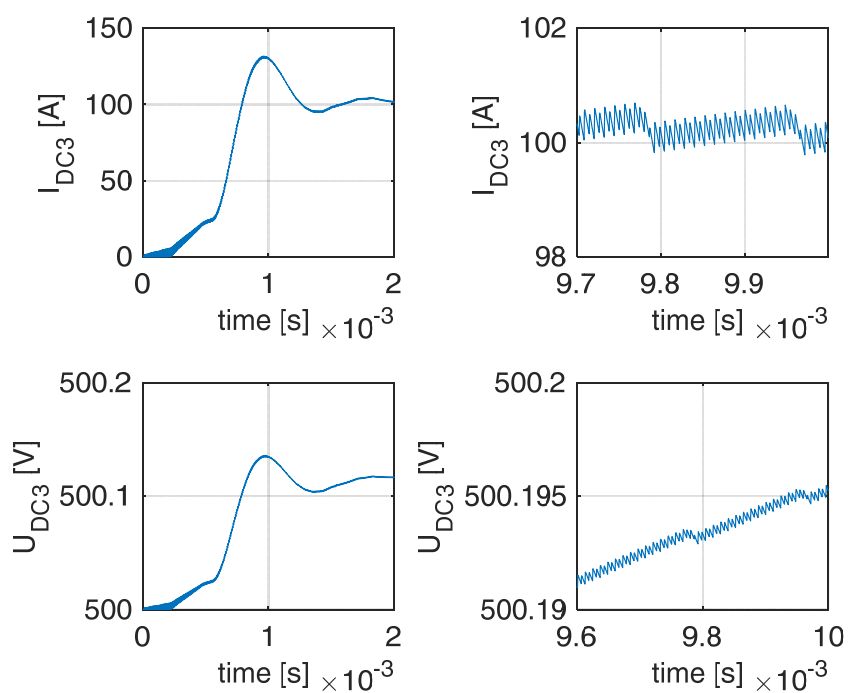
Výstupy elektrické části simulace DCDC jsou uvedeny na Obr. 41 až Obr. 43. Obr. 41 zachycuje start DCDC do nenulových počátečních podmínek meziobvodu DC2 a DC3. Průběh napětí U_{DC3} poté zachycuje nabíjení baterie. Obr. 42 a Obr. 43 zachycuje detail veličin z Obr. 41 po startu a v ustáleném stavu



Obr. 41 Výstup elektrických veličin DCDC - makro



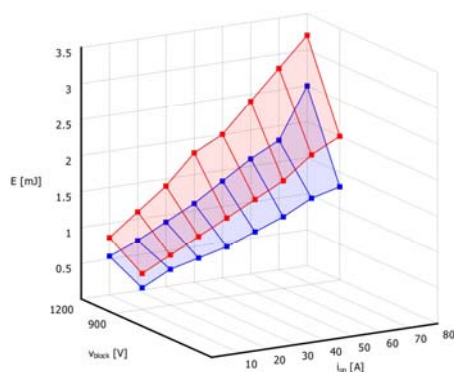
Obr. 42 Výstup elektrických veličin DCDC - detail meziobvodu DC2



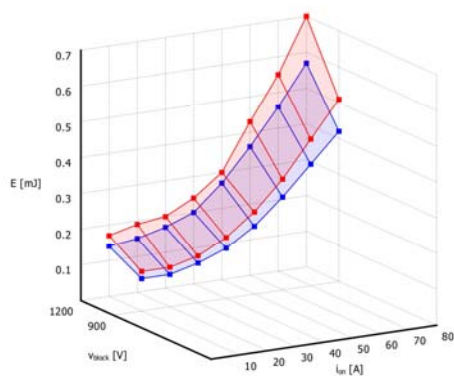
Obr. 43 Výstup elektrických veličin DCDC – detail meziobvodu DC3

Tepelná část simulace vychází z tepelných modelů použitých výkonových prvků v prostředí Simulink-Plecs (MOSFETs - Obr. 44, diody – Obr. 45), které byly ověřeny pomocí tepelných modelů od výrobce (obdobně s kapitolou 6.1.3). Výstupy modelů (výkonové ztráty na prvcích) jsou dále zpracovány ve smyslu Obr. 40 a Obr. 39 (dopočet okamžitých teplot v ustáleném stavu apod.).

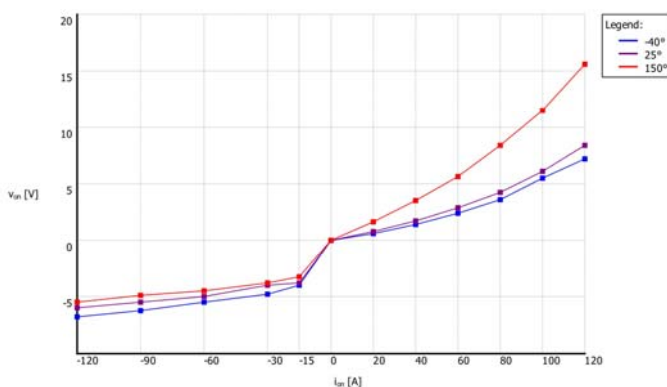
Turn-on losses:



Turn-off losses:



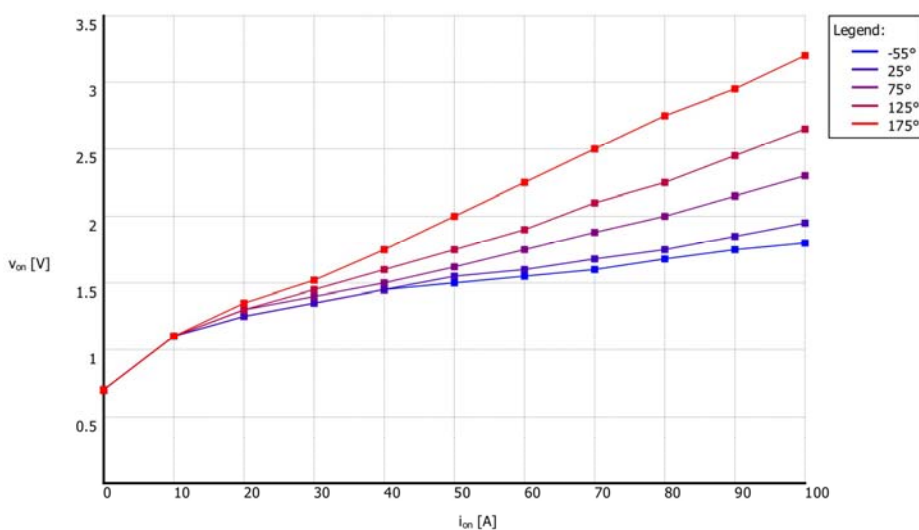
Conduction losses:



	1
R	0.23 K/W
C	0.5 J/K

Obr. 44 Tepelný model [C2M0045170P](#)

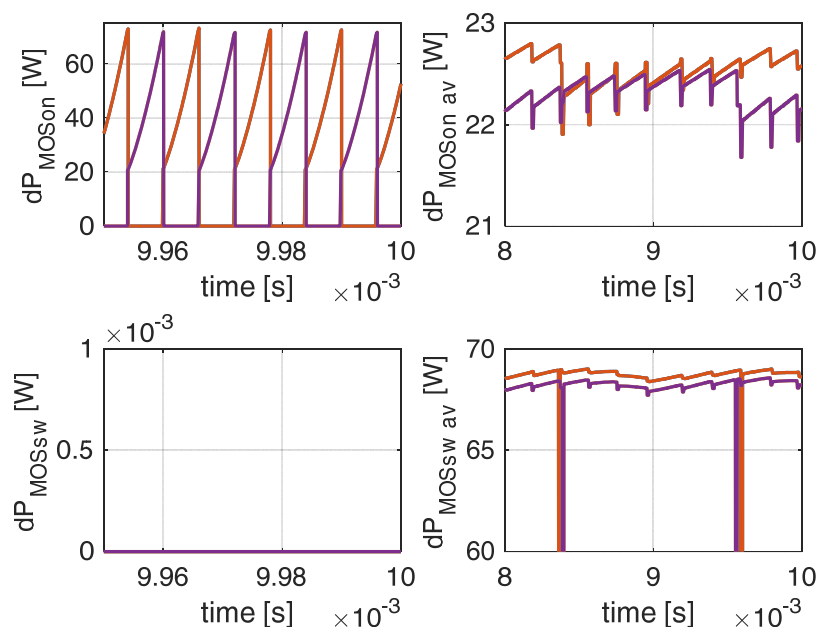
Conduction losses:



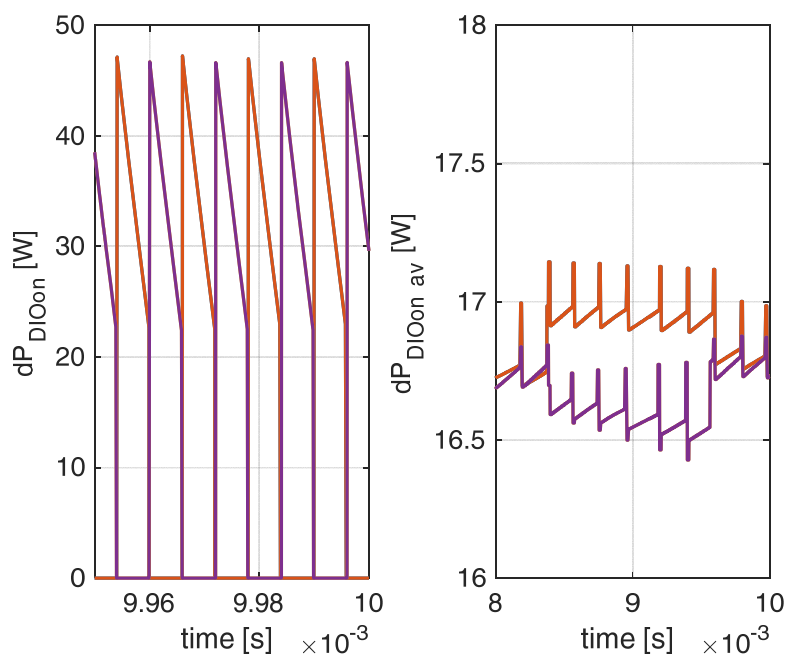
	1
R	0.23 K/W
C	1.5 J/K

Obr. 45 Tepelný model [MSC050SDA017B](#)

Simulované výkonové ztráty na MOSFET jsou zachyceny na Obr. 46 s výbornou shodou s numerickými výpočty ($dP_{on} = 23,7 \text{ W}$ a $dP_{sw} = 57 \text{ W}$ dle Tabulky XXV). Výborná shoda je také dosažena u diod (nulových diod, kde $dP_d = 17,6 \text{ W}$ dle Tabulky XXV). Obr. 78 dále zachycuje teploty v okamžitých hodnotách v ustáleném stavu. Ty se však s analytickými výpočty rozcházejí, neboť simulace respektuje společný chladič s ACDC (detailněji viz kapitola 7.2).

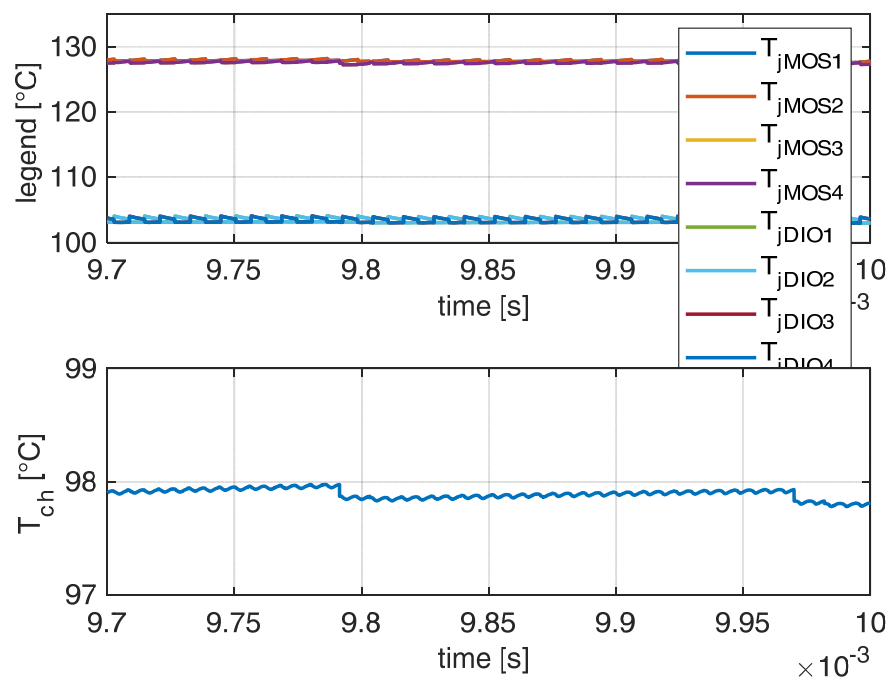


Obr. 46 Výkonové ztráty DCDC - MOSFETs



Obr. 47 Výkonové ztráty DCDC - diody

Add



Obr. 48 Okamžité teploty DCDC v ustáleném stavu

7 Simulace bezdrátové nabíjecí stanice

7.1 Primární část

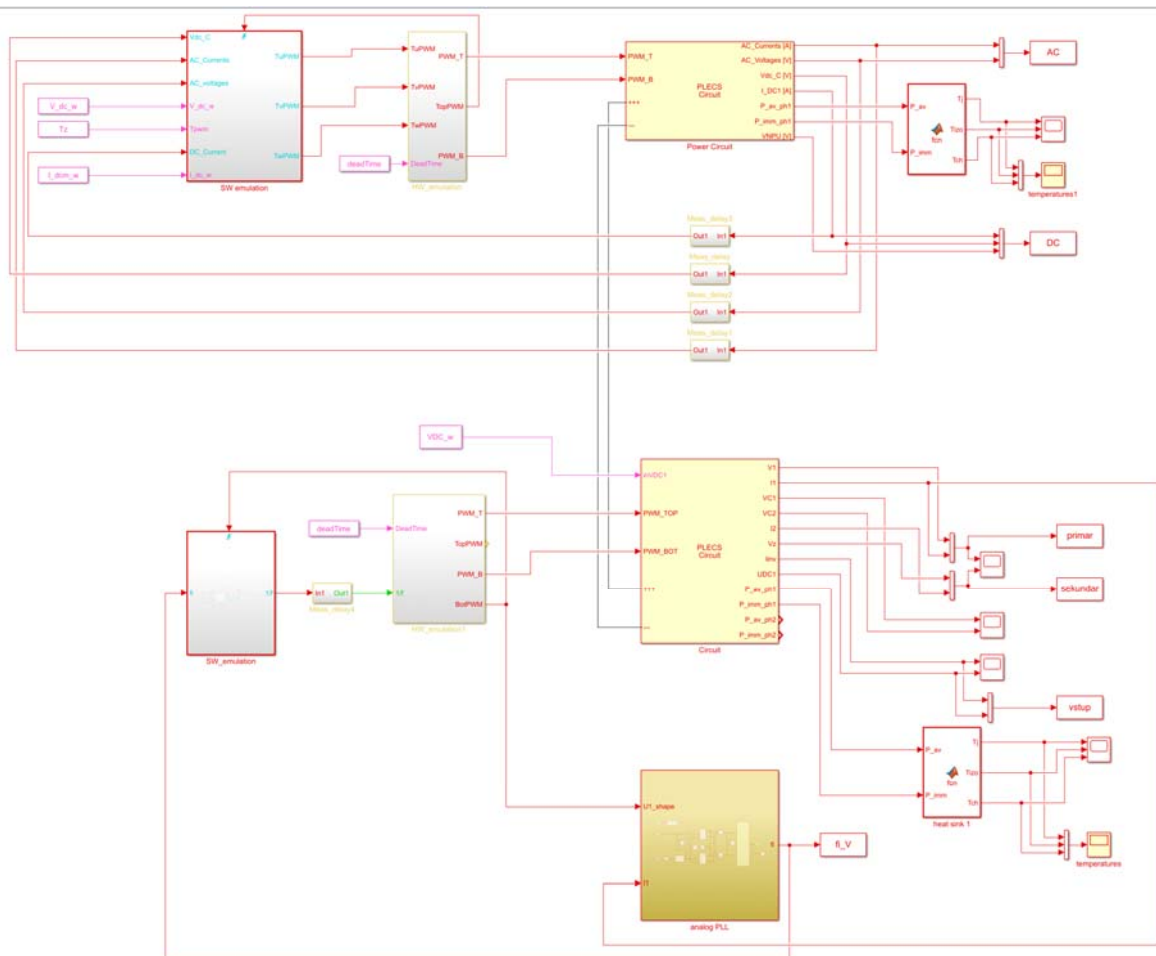
Primární část simulace bezdrátové nabíjecí stanice sestává z:

1. Napájecí napěťový pulzní usměrňovač (3LNPU)
2. DC meziobvod DC1
3. Vstupní střídač (ACDC)

Pro zajištění korektnosti simulace je tato doplněna napájecí část a zátěž

- a. Třífázová síť
- b. Bezdrátový přenos výkonu
- c. Zjednodušená odporová zátěž

Vše zachycuje Obr. 49, na kterém je uvedeno blokové schéma primární části simulace bezdrátové nabíjecí stanice. Ve své podstatě jde o elektricky propojené simulační části 3LNPU (viz kapitola 6.1.3) a DCAC (viz kapitola 5.1.3) pomocí „Plecs - Electrical port“. V horní polovině Obr. 49 je umístěn 3LNPU, ve spodní polovině pak DCAC. Simulace je upravována pouze ve smyslu svého časování. Základní nastavení simulačního kroku činí $1/f_0/1000$ s diskreditací $5 \cdot$ simulační krok.



Obr. 49 Simulační schéma primární části bezdrátové nabíjecí stanice

Ze sumačních schémat silových části 3LNPU a DCAC je zřejmé jejich uložení na oddělených chladičích pro jednotlivé fáze. Parametry vybraných chladičů jsou uvedeny v Tab. XXVII

Tab. XXVII Parametry chladičů primární strany

	3LNPU	DCAC
výrobce	Fischer elektronik	Fischer elektronik
typ	LA 28 ...	LAM 5 K ...
varianta	200 mm / 24 V	150 mm / 24 V
$R_{th} [KW^{-1}]$	0,12	0,2
m [Kg]	0,5	0,5
počet ks	2	3

7.1.1 Elektrické veličiny

Výstupy simulace elektrických veličin jsou totožné s oddělenými simulacemi – pro 3LNPU dle kapitoly 6.1.3 a pro ACDC dle 5.1.3.

7.1.2 Tepelné veličiny

Výstupy simulace tepenných veličin jsou totožné s oddělenými simulacemi – pro 3LNPU dle kapitoly 6.1.3 a pro ACDC dle 5.1.3.

7.2 Sekundární část

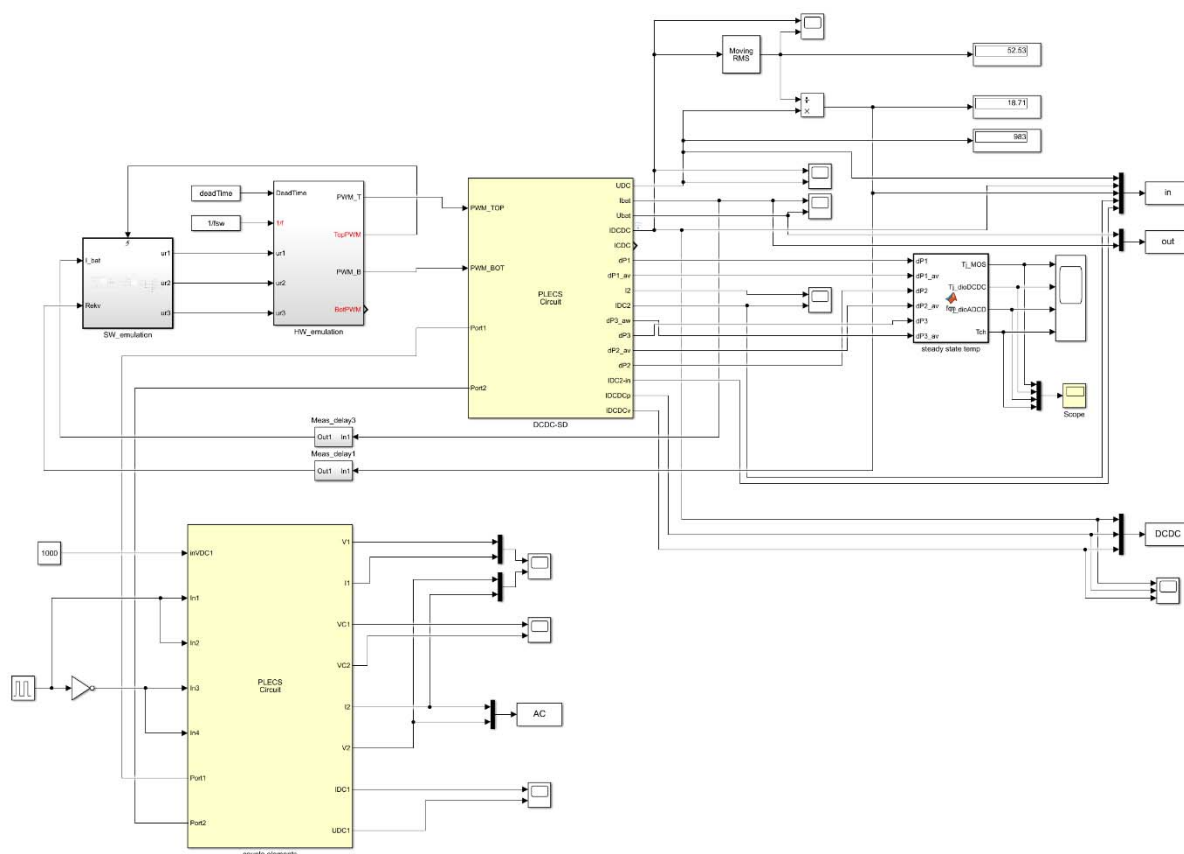
Sekundární část simulace obsahuje kompletní sekundární řetězec bezdrátové nabíjecí stanice z Přílohy 1 (spodní polovina přílohy 1). Částmi tedy jsou:

1. Sekundární vazebný element
2. Výstupní usměrňovač ACDC
3. DCDC měnič v režimu pulzního měniče odporu
4. Náhradní zátěž typu baterie

Z důvodu korektnosti simulace sekundární části simulace obsahuje také zjednodušenou část primární strany bezdrátové nabíjecí stanice a přenosu energie:

- a) Střídač s konstantním výstupem (bez regulace a s $UDC1 = \text{konstanta}$)
- b) Bezdrátový přenos energie (úplný)

Vše zachycuje již uváděný obrázek, pro přehlednost, zde znovu Obr. 49. V jeho horní části je část 1. až 4., v jeho spodní části pak část a) a b). Horní levá část zachycuje regulační bloky DCDC, které jsou předmětem samostatné výzkumné zprávy 22190-012-2020. Horní pravá část zachycuje vykreslování veličin a dopočtu okamžitých teplot v ustáleném stavu (blok Matlab function).



Obr. 50 Simulační schéma sekundární části bezdrátové nabíjecí stanice

Detail simulace silového schéma ACDC s DCDC je uveden v kapitolách 5.2.3 a 6.2.3. Z detailu silové části vyplívá mechanická topologie sekundární části, tedy společný chladič pro ACDC i DCDC měnič o parametrech dle Tab. XXVIII. Spodní část Obr. 50 zachycuje tepelnou část simulace, která byla popsána v kapitolách 6.2.3 a 5.2.3.

Tab. XXVIII Parametry chladiče sekundární strany

výrobce	Fischer elektronik
typ	LA29...
varianta	200 mm / 24 V
$R_{th} [KW^{-1}]$	0.065
m [Kg]	1
Počet ks	1

Simulace je provedena v diskretním čase se simulačním krokem $1/f_0/1000$ s, diskreditací 5* simulační krok a mrtvé časy 1 μ s.

7.2.1 Elektrické veličiny

Výstupy elektrických veličin simulace sekundární strany bezdrátové nabíjecí stanice jsou shodné s **odstavci 5.2.3 a 6.2.3**, jelikož je sekundární strana řešena jen jako celek.

7.2.2 Tepelné veličiny

Výstupy tepelných veličin simulace sekundární strany bezdrátové nabíjecí stanice jsou shodné s **odstavci 5.2.3 a 6.2.3**, jelikož je sekundární strana řešena jen jako celek. Celkový výkon odváděný chladičem je dán součtem okamžitých ztrátových výkonů na ACDC a DCDC současně. Orientačně lze analyticky stanovit střední teplotu chladiče ze součtu středních výkonových ztrát ACDC a DCDC na 91,5 °C. tato hodnota je v dobré shodě s teplotou chladiče získanou simulací a to 97,9 °C

8 Bilance bezdrátové nabíjecí stanice

Bilance návrhu bezdrátové nabíjecí stanice při použitém řízení dle výzkumné zprávy 22190-012-2020 je uvedena v této kapitole. V Tab. XXIX je uvedeno shrnutí výkonových ztrát jednotlivých bloků bezdrátové nabíjecí stanice. Následující Tab. XXX shrnuje teoreticky dosahované účinnosti jednotlivých bloků i celé bezdrátové nabíjecí stanice. Celkově lze návrh prototypu 50 kW bezdrátové nabíjecí stanice označit za velmi kvalitní a vysoce účinný, což dává možnost jeho výroby.

Tab. XXIX Bilance výkonových ztrát

primární strana		přenos výkonu		sekundární strana	
$dP_{3LNPU} [W]$	282,5	$dP_{\text{přenos}}$	500	$dP_{ACDC} [W]$	57,8
$dP_{DCAC} [W]$	215,8			$dP_{DCDC} [W]$	391,2
$dP_{DC1} [W]$	100			$dP_{DC2+3} [W]$	100
sum [W]	598,3	sum [W]	500	sum [W]	549

Tab. XXX Bilance účinností

příkon [W]	51647,3
jmenovitý výkon [W]	50000
totální ztrátový výkon [W]	1647,3
totální účinnost [%]	96,810
účinnost primární [%]	98,818
účinnost sekundární [%]	98,914
účinnost přenosu [%]	99

Součástí bilance je také soupis pasivních a polovodičových prvků, který je pro primární část uveden v Tab. XXXI a pro sekundární část v Tab. XXXII.

Tab. XXXI Soupis pasivních a polovodičových prvků – primární část

primární část								
3LNPU			DC1			DCAC		
díl	odkaz	ks	díl	odkaz	ks	díl	odkaz	ks
prvky	C2M0045170P	18	Crec	B25690A1267K701	1	prvky	C2M0045170D	8
chladič	LA 28 - 200 mm / 24V	3	LDC1	Skybergtech	1	chladič	LAM 5 K...	2
izolační podložky	AOS 247	18	LL	Skybergtech	3	izolační podložky	AOS 247	8
			Cinv	B25690C2487K003	2	spony	THFU 3	60
			Csw	B58035U9255M001	5			

Tab. XXXII Soupis pasivních a polovodičových prvků – sekundární část

sekundární část											
ACDC			DC2			DCDC			DC3		
díl	odkaz	ks	díl	odkaz	ks	díl	odkaz	ks	díl	odkaz	ks
prvky	MSCDC200H170AG	1	CDC2	B25690A1387K703	1	prvky MOSFET	C2M0045170P	4	CDC3	B25620B1127K201	1
chladič	LA29 - 200 mm / 24 V	1				prvky DIODE	MSC050S DA017B	4	LDC3	Skybergtech	3
						chladič	LA29 - 200 mm / 24 V	0			
						izolační podložky	AOS 247	20			

9 Výroba Prototypu

Výroba prototypu 50 kW bezdrátové nabíjecí stanice bude řešena etapově:

- Vazebné elementy
- Střídač
- Sekundární strana polovodičový měničů (ACDC a DCDC)
- Napájecí usměrňovač (3LNPU)

O jednotlivých etapách budou referovat samostatné výzkumné zprávy.

10 Závěr

Tato výzkumná zpráva zprostředkovává základní požadavky a návrh základních výkonových komponent pro 50 kW prototyp bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů. Výkonová topologie se řídí přehledovým schématem z Přílohy 1, pro niž jsou navrženy (vybrány) pasivní prvky a polovodičové prvky. Součástí výběru je precizní výkonová a tepelná simulace v okamžitých hodnotách.

Veškerý návrh výkonových bloků, jako je napájecí usměrňovač 3LNPU, vstupní střídač DCDAC, výstupní usměrňovač ACDC a stejnosměrný pulzní měnič DCDC jsou při návrhu a simulacích řízeny ve smyslu Přílohy 2 (tedy výzkumné zprávy 22190-012-2020).

Koncepce chlazení byla zvolena vzduchová s nucenou ventilací.

Hlavním přínosem této výzkumné zprávy je poskytnutí základních stavebních kamenů pro detailní návrh a konstrukci jednotlivých výkonových bloků 50 kW bezdrátové nabíjecí stanice elektromobilů.

Literatura

- [1] P. Goran, Nabíjecí stanice pro elektrická vozidla, bakalářská práce, ZČU/FEL/KEV, 2018
- [2] F. Vondrášek, Výkonová elektronika, svazek I, ZČU v Plzni/FEL/KEV, ISBN: 80-7082-136-1, 1994
- [3] 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 Topologie řízení.	8
Obr. 5 Přehledové schéma implementace řízení.	8
Obr. 6 Detail výkonového obvodu – blokový	11
Obr. 7 Vazebné elementy systému WPT – základní geometrie	13
Obr. 8 Vazebné elementy systému WPT – finální podoba.....	13
Tab. I Návrhové parametry 50kW vazebných elementů.....	14
Obr. 9 simulace 50 kW vazebných elementů – účinností mapa	14
Obr. 10 simulace 50 kW vazebných elementů – výkonová mapa	15
Obr. 11 simulace 50 kW vazebných elementů – napěťová mapa (U_2)	15
Tab. II Rozvaha parametrů bezdrátového přenosu.....	16
Obr. 12 Výkonová topologie DCAC.....	17
Tab. III Parametry kapacit DCAC.....	18
Tab. IV Vybrané kondenzátory pro 50kW prototyp	18
Tab. V Základní parametry uvažovaných polovodičových prvků (MOSFETs).....	18
Tab. VI Stanovení paralelního řazení a proudů prvky	19
Tab. VII Výkonové ztráty na prvcích	20
Tab. VIII tepelná analýza prvků	20
Obr. 13 Základní simulace DCAC	21
Obr. 14 Výkonový obvod DCAC.....	21
Obr. 15 Elektrické veličiny DCAC – vlevo při $U_{DC1} = 622$ V (strat z 50 kW), vpravo při $U_{DC1} = 1000$ V (start z 50 kW).....	22
Obr. 16 Elektrické veličiny DCAC - vlevo při $U_{DC1} = 622$ V (strat z 50 kW), vpravo při $U_{DC1} = 1000$ V (start z 50 kW).....	22
Obr. 17 Elektrické veličiny vazebných elementů při $U_{DC1} = 1000$ V: vlevo makro, vpravo: detail zapnutí do nenulových poč. pod. a ustáleného stavu	22
Obr. 18 Ztrátový model C2M0045170D – vlevo nahoře: spínací energie, vpravo nahoře: vypínací energie, vlevo dole: vodivostní ztráty, vpravo dole tepelný řetězec.....	23
Obr. 19 Výstupy ztrátového modelu jedné fáze DCAC	24
Obr. 20 Výstup teplot v ustáleném stavu pro jednu fázi DCAC	24
Obr. 21 Výkonová topologie ACDC.....	25
Tab. IX Parametry C_{DC2}	25
Tab. X Vybraný kondenzátor C_{DC2} pro 50 kW prototypy	26
Tab. XI Parametry vybraných prvků ACDC	26
Tab. XII Proudové zatížení prvků ACDC	26
Tab. XIII Střední výkonové ztráty na prvcích ACDC	27
Tab. XIV Teploty na ACDC.....	27
Obr. 22 Simulace ACDC (sekundární strany bezdrátové nabíjecí stanice).....	28
Obr. 23 Simulace ACDC – výkonová část.....	28
Obr. 24 Elektrické veličiny ACDC ($U_{DC1} = 1000$ V).....	29
Obr. 25 Elektrické veličiny ACDC – v ustálený stavu ($U_{DC1} = 1000$ V).....	29
Obr. 26 Tepelný model MSCD200H170AG - vodivostní.....	30
Obr. 27 Výkonové ztráty na prvcích ACDC	30

Obr. 28 Teploty čipů ACDC a chladiče sekundární strany (dle topologie z Obr. 23).....	31
Obr. 29 Výkonová topologie 3LNPU.....	32
Tab. XV Návrhové parametry pasivních prvků 3LNPU	33
Tab. XVI Vybrané pasivní prvky pro 3LNPU	33
Tab. XVII Parametry uvažovaných výkonových prvků pro 3LNPU	34
Tab. XVIII střední hodnoty proudů na prvcích 3LNPU.....	34
Tab. XIX Střední výkonové ztráty na prvcích 3LNPU	35
Tab. XX Střední teploty pro 3LNPU.....	35
Obr. 30 Simulační schéma 3LNPU	36
Obr. 31 Simulační schéma výkonové části 3LNPU	36
Obr. 32 Elektrické veličiny 3LNPU – vlevo: napájecí část, vpravo: výstupní část.....	37
Obr. 33 Elektrické veličiny 3LNPU – detail vstupní části	37
Obr. 34 Elektrické veličiny 3LNPU - Detail výstupní části.....	38
Obr. 35 Tepelný model výrobce pro C2M0045170P – vlevo nahoře: Eon, vpravo nahoře: Eoff, vlevo uprostřed: vodivostní ztráty MOSFET, vpravo uprostřed: vodivostní ztráty zpětné diody, dole: model přestupu tepla z čipu na pouzdro.	39
Obr. 36 Výkonové ztráty na prvcích 3LNPU	40
Obr. 37 Teploty na 3LNPU	40
Obr. 38 Schéma silové části DCDC.....	41
Tab. XXI Stanovené parametry pasivních prvků DCDC.....	42
Tab. XXII Parametry zvolených pasivních prvků DCDC.....	42
Tab. XXIII Parametry uvažovaných výkonových prvků DCDC.....	42
Tab. XXIV Proudové zatížení prvků DCDC.....	43
Tab. XXV Střední výkonové ztráty prvků DCDC	43
Tab. XXVI Střední teploty na prvcích DCDC	43
Obr. 39 Simulační schéma DCDC.....	44
Obr. 40 Simulační schéma výkonové části DCDC	45
Obr. 41 Výstup elektrických veličin DCDC - makro	45
Obr. 42 Výstup elektrických veličin DCDC - detail meziobvodu DC2	46
Obr. 43 Výstup elektrických veličin DCDC – detail meziobvodu DC3.....	46
Obr. 44 Tepelný model C2M0045170P	47
Obr. 45 Tepelný model MSC050SDA017B.....	47
Obr. 46 Výkonové ztráty DCDC - MOSFETs	48
Obr. 47 Výkonové ztráty DCDC - diody	48
Obr. 48 Okamžité teploty DCDC v ustáleném stavu.....	49
Obr. 49 Simulační schéma primární části bezdrátové nabíjecí stanice.....	50
Tab. XXVII Parametry chladičů primární strany.....	51
Obr. 50 Simulační schéma sekundární části bezdrátové nabíjecí stanice.....	52
Tab. XXVIII Parametry chladiče sekundární strany.....	53
Tab. XXIX Bilance výkonových ztrát.....	53
Tab. XXX Bilance účinností.....	53
Tab. XXXI Soupis pasivních a polovodičových prvků – primární část.....	54
Tab. XXXII Soupis pasivních a polovodičových prvků – sekundární část.....	54

Seznam tabulek

Tab. I Návrhové parametry 50kW vazebných elementů.....	14
Tab. II Rozvaha parametrů bezdrátového přenosu.....	16
Tab. III Parametry kapacit DCAC.....	18
Tab. IV Vybrané kondenzátory pro 50kW prototyp	18
Tab. V Základní parametry uvažovaných polovodičových prvků (MOSFETs).....	18
Tab. VI Stanovení paralelního řazení a proudů prvky	19
Tab. VII Výkonové ztráty na prvcích	20
Tab. VIII tepelná analýza prvků	20
Tab. IX Parametry C_{DC2}	25
Tab. X Vybraný kondenzátor C_{DC2} pro 50 kW prototypy	26
Tab. XI Parametry vybraných prvků ACDC	26
Tab. XII Proudové zatížení prvků ACDC	26
Tab. XIII Střední výkonové ztráty na prvcích ACDC	27
Tab. XIV Teploty na ACDC.....	27
Tab. XV Návrhové parametry pasivních prvků 3LNPU	33
Tab. XVI Vybrané pasivní prvky pro 3LNPU	33
Tab. XVII Parametry uvažovaných výkonových prvků pro 3LNPU	34
Tab. XVIII střední hodnoty proudů na prvcích 3LNPU.....	34
Tab. XIX Střední výkonové ztráty na prvcích 3LNPU	35
Tab. XX Střední teploty pro 3LNPU.....	35
Tab. XXI Stanovené parametry pasivních prvků DCDC.....	42
Tab. XXII Parametry zvolených pasivních prvků DCDC.....	42
Tab. XXIII Parametry uvažovaných výkonových prvků DCDC.....	42
Tab. XXIV Proudové zatížení prvků DCDC.....	43
Tab. XXV Střední výkonové ztráty prvků DCDC	43
Tab. XXVI Střední teploty na prvcích DCDC	43
Tab. XXVII Parametry chladičů primární strany.....	51
Tab. XXVIII Parametry chladiče sekundární strany.....	53
Tab. XXIX Bilance výkonových ztrát.....	53
Tab. XXX Bilance účinností.....	53
Tab. XXXI Soupis pasivních a polovodičových prvků – primární část	54
Tab. XXXII Soupis pasivních a polovodičových prvků – sekundární část.....	54

Historie revizí

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

Přílohy

Přehledové schéma výkonových prvků	61
Přehledové schéma řízení	62

