

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80591

用于混合储能系统供电的无线电能传输技术效率优化策略研究

耿宇宇 杨中平 林 飞 王 义
(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 混合储能系统具有高功率密度和高能量密度的双重优势,但是很少有研究考虑混合储能系统的无线充电策略设计,本文考虑无线电能传输技术特性,优化了混合储能系统的功率分配策略。首先,给出无线电能传输系统对混合储能系统充电的电路,补偿拓扑采用原边电感/电容/电容方式-副边串联电容方式。这种补偿拓扑具有恒定的二次电压输出,如果适当调整混合储能系统的功率,即可改变无线电能传输系统的等效负载,使其达到最优值,从而维持系统最优效率。其次,优化设计了混合储能系统的功率分配方式,提出混合储能系统的无线充电策略。这种策略既能满足系统能量输出的要求,又能保证系统高效工作。最后,通过实验验证了上述方法的可行性。

关键词: 无线电能传输技术 混合储能系统 优化控制 功率分配 效率最优

中图分类号: TM135

Efficiency Optimization Strategy for Wireless Power Transfer Used in Hybrid Energy Storage System

Geng Yuyu Yang Zhongping Lin Fei Wang Yi

(School of Electrical Engineering Beijing Jiaotong University Beijing 100044 China)

Abstract Hybrid energy storage system (HESS) has dual advantages of high power density and high energy density, but it is rarely discussed for wireless power transfer (WPT) system. Considering the characteristics of WPT system, this paper optimized the power allocation strategy of HESS. First, the circuit of the WPT system charging for HESS is proposed, the circuit adopts a primary-side inductor/capacitor/capacitor compensation and secondary-side series compensation topology. The compensation topology has a constant voltage output of the secondary side, the equivalent load of the coupling coils can be controlled to the optimal value if the input power of HESS is adjusted properly, thus the system optimal efficiency is maintained. At the same time, the wireless charging strategy of HESS is designed according to the power allocation mode of HESS. This control strategy can not only meet the requirements of the system energy output, but also maintain high efficiency of the system. Finally, the feasibility of the control method is verified by experiments.

Keywords: Wireless power transfer, hybrid energy storage system, optimization control, power allocation, efficiency optimization

0 引言

无线电能传输 (Wireless Power Transfer, WPT) 技术因为通过非接触方式供电, 没有物理上的电气接触, 所以供电设备可以避免恶劣环境影响, 已经发展为一个新型的供电模式。WPT 技术供电方式灵活, 可以静止式充电, 也可以移动式供电, 相关技术已经在电动车辆上得到了关注和应用^[1-3]。

在车载储能系统中, 电池/超级电容混合储能系统 (Hybrid Energy Storage System, HESS) 由于兼具高能量和高功率密度的优点^[4-6], 引起了人们的关注。本文考虑混合储能系统作为无线电能传输系统的用电负载, 以有轨电车为例给出了充电拓扑, 如图 1 所示。地面变流器主要由直流电源和逆变器组成, 线圈及耦合机构包括原边线圈、副边线圈及补偿环节, 车载变流器包括整流器和直流变换器, 还有由超级电容组和电池组构成的混合储能负载。不同的负载对 WPT 系统特性有不同的影响。目前, WPT 技术研究中通常采用电池负载, 也有部分研究考虑超级电容负载, 充电方案的提出是基于相应的负载模式^[7-10]。为了满足系统工作效率和负载能量需求的传输要求, 文献[11]提出一个最大的能量效率跟踪方法, 整流器后的直流变换器控制恒压输出, 输入侧的逆变器调整输入功率从而跟踪系统的最大效率。文献[12]提出一种基于 LCL 补偿方式的双边控制方案, 以提高为电池充电的系统效率。系统效率和负载能量需求是两个控制目标, 所以需要两个控制环节, 通常为原边逆变器和副边直流变换器, 因此这些方法都需要原边和副边双端进行控制调节。

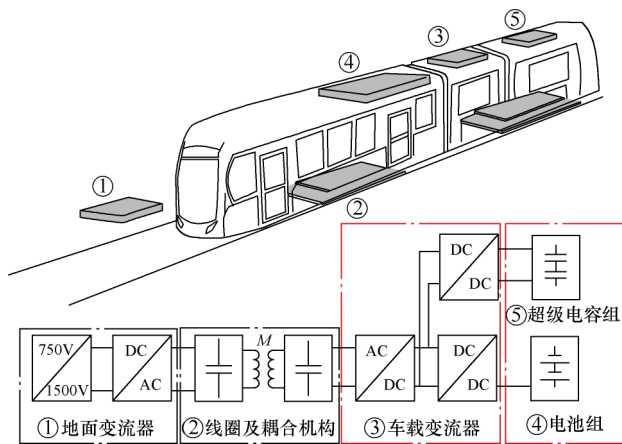


图 1 有轨电车混合储能系统无线充电结构

Fig.1 WPT structure of HESS for trams

对于 HESS 在 WPT 系统中的应用, 文献[13]基于多次无线充电并考虑实际应用情况设计了混合储

能系统的容量配置, 其中超级电容是通过直流变换器直接与电池连接的。文献[14]提出电动汽车的混合储能充电方案及主电池恒流充电的功率控制方法, 超级电容同样是通过直流变换器连接到电池上。但是上述文献没有研究效率的优化控制。

本文基于具有恒压输出特性的无线电能传输系统提出了混合储能负载的充电策略。利用 HESS 和合理的功率分配策略, 可以使线圈输出电阻维持在最优负载点, 由于补偿拓扑具有二次侧恒压输出的特点, 调节输出功率可以维持最优工作点。功率调节环节均在副边实现, 避免了原副边的无线通信, 同时满足了负载传输功率和系统最优传输效率的要求。

本文首先在系统模型中给出基于 HESS 负载的 WPT 电路。根据电路等效模型推导出系统参数的数学关系式, 并给出了实现最大效率运行时的最优负载及对应的最优工作点。其次, 进行控制策略分析, 总结了典型的双边控制方法, 并提出本文采用的功率分配方式和控制策略。在实验验证部分, 介绍了实验平台, 并进行控制策略的实验验证。最后得出本文结论。

1 WPT 系统模型

基于混合储能系统负载的无线电能传输系统 (称为 WPT-HESS) 如图 2 所示, 直流恒压源通过单相逆变器产生高频交流电, 该交流电作为耦合线圈的输入电源; 为了提高耦合线圈的性能, 原边采用电感/电容/电容组合的补偿方式, 副边采用电容串联的补偿方式, 简称为 LCC-S 补偿。该补偿方式可以维持原边输入电流恒定, 在副边串联补偿的情况下可以实现恒压输出, 有利于整流后直流变换器

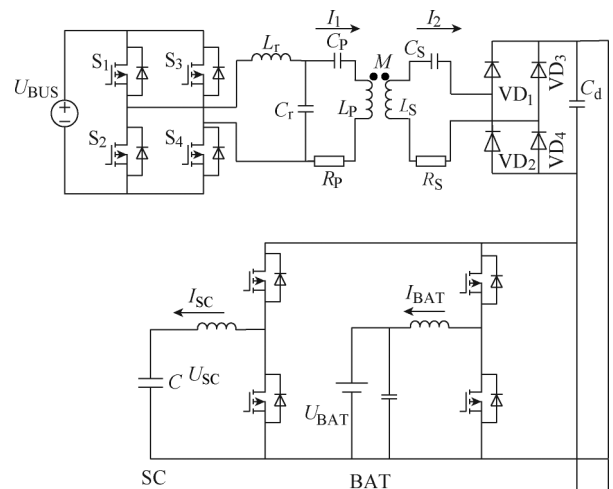


图 2 基于 HESS 的 WPT 系统结构

Fig.2 The diagram of WPT system based on HESS

的调节和控制，并且具有可调的电压增益，适合电动车辆的应用工况^[15]。耦合线圈通过电磁感应原理实现无线电能传输，通过整流器获得直流电，然后根据负载的功率需求进行电能变换。考虑 WPT-HESS 在电动车辆中的应用，双向 DC-DC 变换器用于调节电池（Battery, BAT）和超级电容器（Super-Capacitor, SC）的充电，充电工作在 Buck 模式。

图 2 中， U_{BUS} 是直流母线电压， U_{SC} 、 U_{BAT} (I_{SC} 、 I_{BAT}) 是超级电容和电池的充电电压（电流）， $S_1 \sim S_4$ 是逆变器的全控型半导体开关， $VD_1 \sim VD_4$ 是整流桥的二极管， R_p (R_s)、 L_p (L_s) 和 C_p (C_s) 是原边（副边）线圈的电阻、电感和串联补偿的电感， M 是线圈互感， L_r 是原边串联补偿电感， C_r 是原边并联补偿电容。

1.1 补偿特性分析

为了便于分析，本文采用典型的互感模型分析基于 LCC-S 补偿拓扑的 WPT 系统特性^[15]，将图 2 的电路做简化处理，利用交流电压源代替直流电源和逆变器，整流器后部分等效为电阻 R_{eq} ，等效电路如图 3 所示。因为电池和超级电容并联连接，并且双向 DC-DC 变换器在降压模式，因此超级电容和电池的等效电阻和耦合线圈的输出等效电阻关系为

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{U_{Cd}}{D_1 I_{SC} + D_2 I_{BAT}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{D_1^2 G_{eq_SC} + D_2^2 G_{eq_BAT}} \quad (1)$$

式中， D_1 和 D_2 分别为超级电容和电池控制器的占空比； U_{Cd} 为支撑电容 C_d 两端电压； G_{eq_SC} 和 G_{eq_BAT} 分别为超级电容和电池的等效电导，即充电电流除以充电电压。

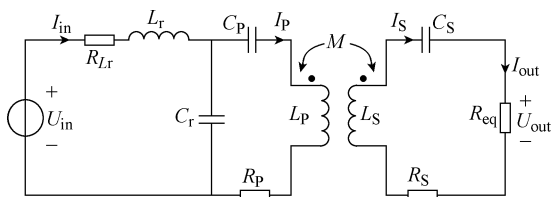


图 3 LCC-S 电路拓扑

Fig.3 LCC-S compensation circuit

直流电源和逆变器可等效为交流电压源，直流电压幅值 U_{BUS} 与交流电源电压有效值 U_{in} 的关系为

$$U_{in} = \frac{2\sqrt{2}U_{BUS}}{\pi} \quad (2)$$

考虑线圈及电感电阻的存在，采用二端口网络方法分析系统参数如图 4 所示。该系统是一个恒压源输入， Z_{RE} 是副边的反射阻抗。所以两端口模型的基本表达式为

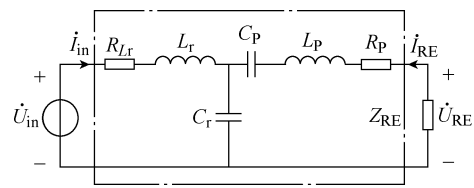


图 4 LCC-S 二端口电路拓扑

Fig.4 LCC-S two-network theory circuit

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{U}_{RE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{in} \\ \dot{I}_{RE} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$Z_{11} = \left. \frac{\dot{U}_{in}}{\dot{I}_{in}} \right|_{\dot{I}_{RE}=0} = R_{Lr} + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} \quad (4)$$

$$Z_{12} = \left. \frac{\dot{U}_{in}}{\dot{I}_{RE}} \right|_{\dot{I}_{in}=0} = \frac{1}{j\omega C_r} \quad (5)$$

$$Z_{21} = \left. \frac{\dot{U}_{RE}}{\dot{I}_{in}} \right|_{\dot{I}_{RE}=0} = \frac{1}{j\omega C_r} \quad (6)$$

$$Z_{22} = \left. \frac{\dot{U}_{RE}}{\dot{I}_{RE}} \right|_{\dot{I}_{in}=0} = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{1}{j\omega C_r} \quad (7)$$

根据电路理论，当二端口网络参数 L_r 、 C_r 、 C_p 、 L_p 满足式 (8) 时，输入阻抗虚部为零。

$$\begin{cases} \omega L_r = \frac{1}{\omega C_r} = \omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} \\ \omega L_s = \frac{1}{\omega C_s} \end{cases} \quad (8)$$

当参数满足式 (8) 的补偿要求时，方程式 (4)~(7) 可以简化为

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} R_{Lr} & j\omega L_r & j\omega L_r & R_p \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

根据二端口网络原理，得到电压增益表达式为

$$\begin{aligned} G_U &= \left| \frac{U_{RE}}{U_{in}} \right| = \frac{Z_{21} Z_{RE}}{Z_{11} (Z_{RE} + Z_{22}) - Z_{12} Z_{21}} \\ &= \frac{\omega L_r Z_{RE}}{R_{Lr} (Z_{RE} + R_p) + (\omega L_r)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

同理，计算耦合线圈输出电压与发射阻抗两端电压的增益，得到

$$\left| \frac{U_{out}}{U_{RE}} \right| = \left| \frac{j\omega M \dot{I}_p R_{eq}}{R_s + R_{eq}} \right| = \frac{R_{eq}}{\omega M} \quad (11)$$

所以，从逆变器的输出到耦合线圈的输出电压增益为

$$H_U = \left| \frac{U_{out}}{U_{in}} \right| = \left| \frac{U_{out}}{U_{RE}} \right| \left| \frac{U_{RE}}{U_{in}} \right| = \frac{\omega^2 M L_r \frac{R_{eq}}{R_S + R_{eq}}}{R_{Lr} \left[\frac{(\omega M)^2}{R_S + R_{eq}} + R_p \right] + (\omega L_r)^2} \quad (12)$$

在电压电流参数分析中，线圈和谐振电感的内阻远小于感抗值与角频率的乘积和等效负载，因此电压增益 H_U 可简化为

$$H_U \approx \frac{M}{L_r} \quad (13)$$

可以看出， H_U 可以近似为 M 和 L_r 之比。即使等效电阻变化，在输入电压恒定的情况下， U_{out} 可以保持准恒定状态，也就是副边直流母线电压 U_{Cd} 将保持准恒定状态。此外，如果 M 确定，系统的电压增益可以通过选择 L_r 值来调节。

为了求解系统效率，计算两端口网络的电流增益，得到

$$G_I = \left| \frac{I_{RE}}{I_{in}} \right| = \frac{Z_{21}}{Z_{RE} + Z_{22}} = \frac{\omega L_r}{Z_{RE} + R_p} \quad (14)$$

在 WPT 系统处于谐振状态时，同时忽略变换器（包括逆变器、整流器和直流变换器）的损耗，可以得到系统的效率表达式为

$$\eta = \frac{U_{RE} I_{RE}}{U_{in} I_{in}} \cdot \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_S} = G_U G_I \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_S} \quad (15)$$

代入 G_U 和 G_I 表达式，系统效率可以表示为

$$\eta = \frac{\omega^4 M^2 L_r^2 \frac{R_{eq}}{(R_S + R_{eq})^2}}{\left[\frac{(\omega M)^2}{R_S + R_{eq}} + R_p \right] \left[\frac{(\omega M)^2 R_{Lr}}{R_S + R_{eq}} + R_{Lr} R_p + (\omega L_r)^2 \right]} \quad (16)$$

同时，输出功率为

$$P = \frac{(H_U U_{in})^2}{R_{eq}} \quad (17)$$

1.2 WPT 系统特性分析

耦合系统参数见表 1。根据表 1 所示的参数，可以得到系统功率和效率随等效电阻变化的趋势，如图 5 所示。在等效负载 R_{eq} 逐渐增大的过程中，

系统效率会先增大后减小。如果耦合线圈输出等效电阻取得最优值 R_{opt} ，则耦合系统将工作在高效率状态。

表 1 耦合系统参数

Tab.1 The parameters of the coupling system	
参数	数值
直流母线电压 U_{BUS}/V	75
工作频率 f/kHz	58
原边线圈电感 $L_p/\mu H$	167.7
原边线圈自阻 R_p/Ω	0.19
原边串联补偿电容 C_p/nF	54.7
原边串联补偿电感 $L_r/\mu H$	33.4
原边串联补偿电感自阻 R_{Lr}/Ω	0.3
原边并联补偿电容 $C_R/\mu F$	0.25
副边线圈电感 $L_s/\mu H$	169.7
副边线圈自阻 R_s/Ω	0.27
副边串联补偿电容 C_s/nF	44.4
线圈互感 $M/\mu H$	29.2

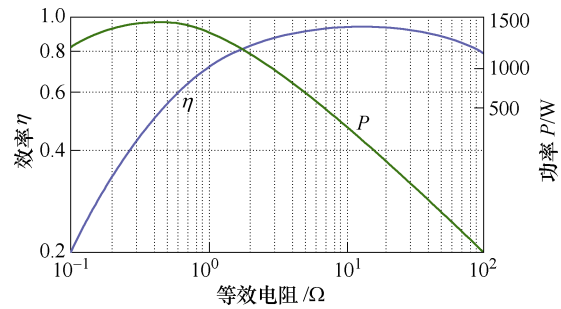


图 5 耦合系统效率和功率曲线

Fig.5 The efficiency and power of coupling system

最大效率工作点的计算可以通过对效率 η 关于 R_{eq} 求导，有

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial R_{eq}} = 0 \\ \frac{\partial^2 \eta}{\partial R_{eq}^2} < 0 \end{cases} \quad (18)$$

可以计算得到最优负载 R_{opt} 为

$$R_{opt} = \sqrt{\frac{\left[\frac{(\omega M)^2}{R_S + R_{eq}} + R_p \right] \left[\frac{(\omega M)^2 R_{Lr}}{R_S + R_{eq}} + R_{Lr} R_p + (\omega L_r)^2 \right]}{R_p \left[(\omega L_r)^2 + R_p R_{Lr} \right]}} \quad (19)$$

当负载发生变化时，可以通过调节副边直流变换器的占空比 D_1 和 D_2 使输出等效电阻 R_{eq} 等于最

统设计时需与 HESS 功率匹配，要考虑超级电容额定充电电流 I_{SCM} 和最大工作电压 U_{SCM} ，因此 WPT 系统额定功率满足

$$P_E \geq U_{SCM} I_{SCM} \quad (23)$$

由于超级电容恒流充电，其充电功率随着充电电压的增加而线性增加，如图 8 中点画线所示，WPT 系统功率减去超级电容功率定义为剩余功率 P_{RE} ，如虚线所示。电池充电功率 P_{BAT} 较小，如实线所示，在第 I 阶段无法完全吸收剩余电量。在第 II 阶段剩余功率可以全部被电池吸收时，电池吸收的最大功率由其额定电压 U_{BATM} 和额定电流 I_{BATM} 的乘积决定，此时 HESS 充电功率等于 WPT 系统的最优功率，也是 WPT 系统的额定功率，实现了超级电容恒流充电、系统满功率运行和最优效率运行。

在电池的最大充电功率低于剩余功率时，如第 I 阶段，HESS 充电功率低于 WPT 系统最优功率值。根据图 5，可以发现充电功率低于额定功率，系统也能保持在较高的效率。

因此，总的功率分配策略就是超级电容按照额定电流进行充电，电池尽可能吸收最优功率减去超级电容功率的剩余功率。

2.2 效率优化控制过程

不同于典型的控制方法，原边和副边控制器均采用闭环控制，本文提出的优化控制方式为：原边控制器采用开环控制，只提供稳定的方波驱动信号，原副边控制器不需通信。所有的闭环控制都可以在副边实现，具体的控制策略如图 9 所示。

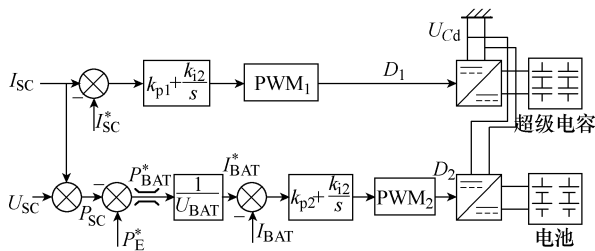


图 9 优化控制方式

Fig.9 Specific control strategy

首先，传感器检测实际超级电容和电池的电压电流，传送到副边控制器。然后控制器比较超级电容实际电流 I_{SC} 与指令值 I_{SC}^* ，通过比例积分（Proportion Integration, PI）调节，基于脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）得到控制超级电容的 Buck 电路的控制信号 D_1 ；接下来，控制器根据超级电容实际电压和电流计算其充电功率 P_{SC} ，有

$$P_{SC} = U_{SC} I_{SC} \quad (24)$$

系统额定功率 P_E^* （即系统最优功率）与 P_{SC} 相减，得到剩余功率，系统额定功率的确定通过系统参数设计决定，如式（22）所示。如果剩余功率低于电池额定充电功率，则剩余功率作为指令值；反之，如果剩余功率大于电池额定功率，则电池额定功率作为指令值。即

$$P_{BAT}^* = \min(P_E^* - P_{SC}, U_{BATM} I_{BATM}) \quad (25)$$

得到电池充电功率的指令值 P_{BAT}^* ，除以电池实际电压 U_{BAT} ，得到电流的指令值 I_{SC}^* ，比较电池实际电流 I_{BAT} 和指令值 I_{BAT}^* ，通过 PI 调节，得到控制电池 Buck 电路的控制信号 D_2 。

为了验证控制过程的可行性，接下来通过实验进行验证。

3 实验验证

3.1 实验平台建立

为了验证控制策略的可行性，搭建 WPT-HESS 的实验平台如图 10 所示。电路结构与图 2 相同，耦合系统参数见表 1，混合储能系统参数列于表 2。考虑补偿电容与线圈电感参数的关系，选择系统工作频率为 58kHz。基于此，设计了耦合系统补偿参数。

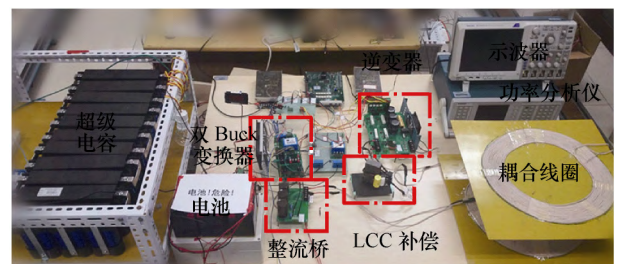


图 10 WPT-HESS 系统实验平台

Fig.10 The platform of the WPT-HESS system

表 2 混合储能系统实验参数

Tab.2 The experimental parameters of HESS system

参 数	数 值
电池额定电压 U_{BATM}/V	50
电池额定电流 I_{BATM}/A	4
电池容量 $C_{BAT}/(A \cdot h)$	1.15
超级电容额定电压 U_{SCM}/V	50
超级电容额定电流 I_{BATM}/A	6
超级电容容量 C/F	16.5

原副边线圈结构相同，绕制形状为单层圆形线圈，共计 18 匝，绕线采用 600 股、每股直径为 0.1mm 的李兹线。整个线圈的外径为 40cm，间隙为 15cm。

验证实验包括对 LCC-S 补偿拓扑恒压输出特性的验证，以及超级电容和电池的功率分配策略的实验实现。WPT-HESS 的最优功率设计为 300W，同时超级电容的额定功率定为 300W，最大充电电流为 6A。对于电池，额定电压大约为 50V，最大吸收功率能力为 200W。部分实验波形如图 11 所示，包括耦合系统的输出电压电流和输入电压电流。由图可以发现，相位为零，电流的波形正弦性良好。

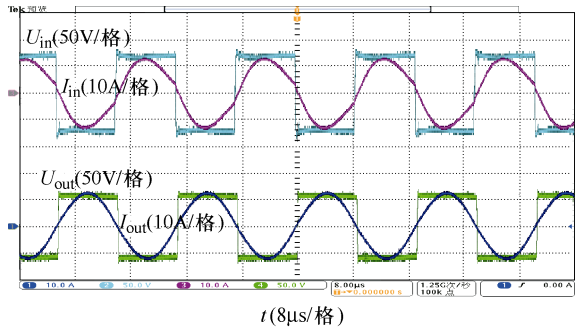


图 11 耦合系统输入和输出的电压电流波形

Fig.11 Input and output waveforms of the coupling systems

3.2 结果分析

首先，耦合系统的输入和输出电压电流的峰值的测试结果如图 12 所示。可以发现在充电过程中输入输出电压是恒定的，因此验证了 LCC-S 补偿拓扑的恒压特性，且电压增益满足对应比例。同时可以看出，输入输出电流也是基本恒定的，这意味着输入和输出功率是恒定的，效率可以维持恒定。

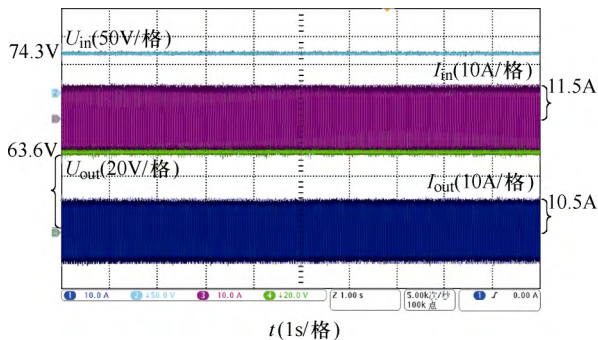


图 12 逆变输入和整流输出电压电流峰值波形

Fig.12 Inverter input and rectifier output voltage and current peak waveforms

HESS 负载的电压电流分配曲线如图 13 所示。可以发现，超级电容的电流 I_{SC} 按照 6A 的恒流进行充电，超级电容电压 U_{SC} 线性增加，这说明超级电容是按照要求进行充电。电池的端电压大约是 50V，充电过程有所下降，这是因为电池温度逐渐升高，

内阻增大导致端电压略微下降。电池充电电流开始 (1~2s) 时较大，然后迅速降到小于 4A，这是因为电池电流 PI 调节过程导致，稳态之后电流低于额定值，满足供电要求。基于该图，HESS 功率分配结果如图 14 所示。忽略起始 1~2s，超级电容的功率 P_{SC} 线性增加到 300W，而电池的功率 P_{BAT} 小于 200W。当 P_{SC} 超过 100W 时， P_{BAT} 开始下降，二者总功率等于系统最优功率 300W。变化趋势符合图 8 的功率分配策略，设计的功率分配策略得以实现。从 0~20s 的时间段是第 I 阶段，之后的过程为第 II 阶段。

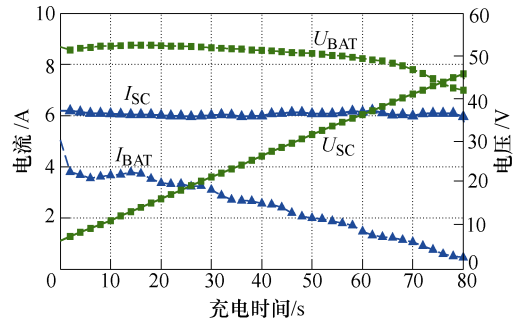


图 13 超级电容和电池的电压电流分配曲线

Fig.13 Voltage and current curves of the battery and supercapacitor

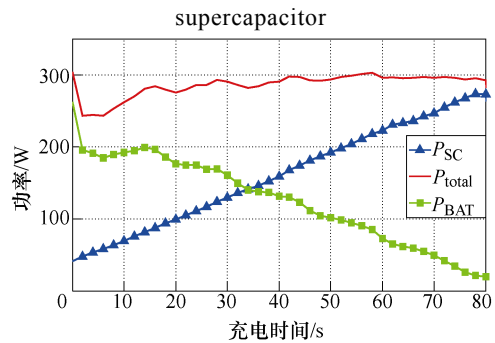


图 14 HESS 功率分配曲线

Fig.14 Power allocation curves of the HESS load

考虑原边逆变器输入到副边整流输出作为系统的效率，对应充电过程的系统效率如图 15 所示，在 0~20s 系统效率逐渐增加，当 20s 过后系统功率维持在 300W，效率维持在最大效率 89%附近，验证了系统优化控制策略的可行性。

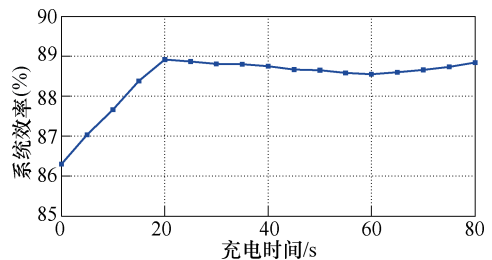


图 15 系统效率分配曲线

Fig.15 The coupling system efficiency curve

4 结论

本文给出了采用混合储能装置作为无线电能传输系统负载的充电拓扑结构。考虑超级电容采用恒流充电,提出电池在额定功率下吸收剩余功率的分配策略;并基于这种功率分配策略,设计系统控制方式。该控制方式不仅可以实现系统充电功率恒定,而且可以保持系统工作在最高效率点,并且避免了原副边的无线通信,可靠性高。最后,通过实验验证了该控制方法的可行性。

参考文献

- [1] 赵争鸣,刘方,陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30-40.
Zhao Zhengming, Liu Fang, Chen Kainan. New progress of wireless charging technology for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 30-40.
- [2] 张波,疏许健,黄润鸿. 感应和谐振无线电能传输技术的发展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 3-17.
Zhang Bo, Shu Xujian, Huang Runhong. The development of inductive and resonant wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 3-17.
- [3] Shin J, Shin S, Kim Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic resonance based wireless power transfer system for roadway powered moving electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1179-1192.
- [4] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
Zhang Chunjiang, Dong Jie, Liu Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [5] 诸斐琴,杨中平,林飞,等. 基于加速时间预测的现代有轨电车储能系统能量管理与容量配置优化研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 158-166.
Zhu Feiqin, Yang Zhongping, Lin Fei, et al. Research on acceleration-time-prediction-based energy management and optimal sizing of onboard energy storage system for modern trams[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 158-166.
- [6] Herrera V I, Gaztañaga H, Milo A, et al. Optimal energy management and sizing of a battery-supercapacitor-based light rail vehicle with a multiobjective approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3367-3377.
- [7] Madawala U K, Thrimawithana D J, Kularatna N. An icpt-supercapacitor hybrid system for surge-free power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 54(6): 3287-3297.
- [8] 蒋勇斌,王跃,刘军文,等. 基于跳频控制策略的串联-串联谐振无线电能传输系统的参数优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 162-174.
Jiang Yongbin, Wang Yue, Liu Junwen, et al. The optimal design methodology of series-series resonant tank parameters of wireless power transmission system based on leap frequency control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 162-174.
- [9] Wang Zhihui, Lu Xiao, Sun Yue, et al. Modeling of power loss in resonant wireless power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 17-21.
- [10] 宋凯,李振杰,杜志江,等. 变负载无线充电系统的恒流充电技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 130-136.
Song Kai, Li Zhenjie, Du Zhijiang, et al. Constant current charging technology for variable load wireless charging system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 130-136.
- [11] Zhong W X, Hui S Y R. Maximum energy efficiency tracking for wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 4025-4034.
- [12] Wu H H, Gilchrist A, Sealy K D, et al. A high efficiency 5kW inductive charger for EVS using dual side control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(3): 585-595.
- [13] Wang Lijuan, Gonder J, Burton E, et al. A cost effectiveness analysis of quasi-static wireless power

transfer for plug-in hybrid electric transit buses[C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Montreal, QC, Canada, 2015: 1-7.

- [14] Hata K, Huang Xiaoliang, Hori Y. Power flow control of magnetic resonance wireless charging for hybrid energy storage system of electric vehicles application[C]//IEEE Society of Instrument and Control Engineers of Japan, Hangzhou, China, 2015: 1459-1462.
- [15] Geng Yuyu, Li Bin, Yang Zhongping, et al. A high efficiency charging strategy for a supercapacitor using a wireless power transfer system based on

inductor/capacitor/capacitor (LCC) compensation topology[J]. Energies, 2017, 10(1): 135.

作者简介

耿宇宇 男, 1992 年生, 博士研究生, 研究方向为大功率无线电能传输技术以及混合储能系统优化控制。

E-mail: slogangyy@163.com (通信作者)

杨中平 男, 1970 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通电力牵引传动技术、高速列车系统优化设计技术和无线电能传输等。

E-mail: zhpyang@bjtu.edu.cn

(编辑 崔文静)