

电动汽车驱动充电一体化控制策略研究

高峰¹, 谈韵¹, 陶远鹏¹, 许竹发¹, 李晓飞¹, 郑昕昕²

(1. 国网合肥供电公司, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对目前电动汽车驱动器和充电机相互独立而占用较大车内空间、增加车辆重量等问题,研究了驱动充电复用型变流器及其控制策略,驱动器和充电机的主功率电路共用一个三相桥式交直流变换(AC/DC)变流器,可实现能量的双向流动。文中给出了复用型变流器在驱动和充电时的工作原理,分析了2种工作状态下的矢量控制策略,通过对比研究得出统一的电流控制结构,实现了驱动器和充电机的一体化,减少了电动汽车空间和重量,同时讨论了控制参数对电流环性能的影响,最后通过仿真实验验证了理论分析。

关键词:电动汽车; 电驱动; 充电; 矢量控制

中图分类号: TM92

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)02-0073-05

0 引言

随着能源危机和环境污染的加剧,由节能环保电动汽车替代传统燃油汽车是未来社会和经济发展的必然趋势^[1]。然而,电动汽车采用车载动力电池作为能量来源,意味着传统汽车的燃油发动机系统将被电驱动系统所替代,且需要通过充电机给动力电池进行充电^[2-6]。实际上,电动汽车电机驱动器和充电机主电路可以采用同一种拓扑和控制策略实现^[7],但目前的驱动器和充电机仍是相互独立的2个部分,这就导致两者占用了较大的车内空间,且增加了车辆的重量。

目前关于电动汽车驱动充电一体化的研究主要集中在主功率拓扑的改进方面,从理论上说,只要能够实现能量双向流动的交直流变换(AC/DC)变流器都可以作为驱动充电一体化的主功率拓扑^[8]。常见的拓扑包括三相桥式拓扑、桥式组合拓扑和改变电机结构的混合拓扑等^[9-12]。

虽然针对电动汽车驱动器和充电机的一体化技术已有较多的研究,但其仍存在的问题。对于改变电机结构的混合拓扑,虽然能够巧妙利用电机绕组减小滤波器体积,但需要对电机进行专门设计,通用性较弱。对于三相桥式拓扑和桥式组合拓扑,针对变流器作为电机驱动器和充电机的工作模式,目前大多仍采用2套独立的控制策略,虽然主功率电路的复用能够减小系统体积和重量,但对应的控制系统仍然较为复杂^[13]。

针对上述问题,采用桥式拓扑作为变流器主功率电路,不需要改变电机本身的结构,可扩展性强,

既可以工作在逆变状态,也可以工作在整流状态^[14-16],分别对应了变流器作为电机驱动器和充电机的工作模式,能够节省体积和成本^[17]。在此基础上,采用矢量控制策略,该方法能够实现对交流信号的无静差跟踪,控制精度高^[18-20],探讨2种工作模式下矢量控制策略下的统一性,从而简化控制系统。

文中采用三相桥式拓扑实现驱动和充电时能量的双向流动,介绍了复用型主功率拓扑的工作原理,将统一矢量控制应用于电动汽车驱动充电一体化控制,提出工作状态的切换逻辑。最后通过搭建基于MATLAB/Simulink的驱动充电一体化系统仿真模型对理论分析进行验证。

1 复用型主功率电路工作原理

图1给出了复用型AC/DC变流器拓扑,为三相桥式结构,通过开关继电器控制驱动和充电2种模式的切换。当变流器作为电机驱动器工作时,其工作在逆变状态,交流侧与电机相连;当作为充电机工作时,其工作在整流状态,交流侧与滤波器和电网相连。无论是作为电机驱动器还是充电机进行工作,变流器直流侧始终与车载动力电池相连接。由于复用拓扑中增加了滤波器,因此采用该拓扑时,应考虑将滤波器安装在车外的交流充电桩内,避免占用车辆空间,增加重量。

图2给出了永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)的等效电路。 R_u, R_v 和 R_w 为定子相电阻; L_u, L_v 和 L_w 为绕组电感; e_u, e_v 和 e_w 为三相电势。变流器能够实现能量的双向流动,说明了三相桥式拓扑应用于电动汽车驱动一体化系统的可行性。对比图1中的电网端电路, e_a, e_b 和 e_c

收稿日期:2017-11-17;修回日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51607052)

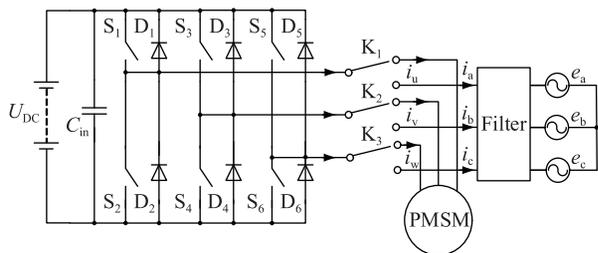


图1 复用型 AC/DC 变流器拓扑

Fig. 1 Topology of the multiplexed AC/DC converter

为电网电压,当采用电感滤波器时,每相滤波器均可看作电感和等效线路阻抗的串联,变流器交流侧所接的 PMSM 或电网具有类似的结构,都可以看作电阻、电感和交流电源的串联,两者的区别在于电阻和电感值不同,交流电源的幅值和频率不同。

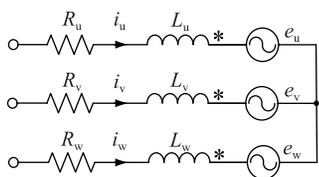


图2 PMSM 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of PMSM

2 统一矢量控制策略

2.1 变流器模型的建立

根据基尔霍夫电压方程,可得到变流器电压电流关系为:

$$e_x(t) = L_x \frac{di_x(t)}{dt} + R_x i_x + U_{DC}(t) S_x + u_{NO} \quad (1)$$

式中: u_{NO} 为直流侧负端与交流侧中点的电压差值; x 为对应的相,当变流器作为电机驱动器工作时, $x = u, v, w$,当变流器作为充电机工作时, $x = a, b, c$; S_x 为对应桥臂功率管的开关函数,当上桥臂功率管导通且下桥臂功率管关断时候,其值为 1,当上桥臂功率管关断且下桥臂功率管导通时,其值为 0。根据式(1)可得到变流器在 dq 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L_y \frac{di_{qy}(t)}{dt} + \omega_y L_y i_{dy}(t) + R_y i_{qy} = e_{qy}(t) - U_{DC}(t) S_{qy} \\ L_y \frac{di_{dy}(t)}{dt} - \omega_y L_y i_{qy}(t) + R_y i_{dy} = e_{dy}(t) - U_{DC}(t) S_{dy} \end{cases} \quad (2)$$

式中: y 表示变流器的工作模式,当 $y=0$ 时,变流器作为电机驱动器工作;当 $y=1$ 时,变流器作为充电机工作。当变流器交流侧与电网连接时, e_{d1} 和 e_{q1} 由电网本身状态所决定,与 i_{d1} 和 i_{q1} 无关,而当变流器交流侧与 PMSM 连接时, e_{d0} 和 e_{q0} 受到 i_{d0} 和 i_{q0} 的影

响,两者的对应关系为:

$$\begin{bmatrix} e_{d0} \\ e_{q0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 + sL_0 & -L_0\omega_0 \\ -L_0\omega_0 & R_0 + sL_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d0} \\ i_{q0} \end{bmatrix} + \omega_0 \psi_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 矢量控制策略及参数设计

图 3 给出了矢量控制策略流程,根据图 2,变流器交流侧可以统一为电阻、电感和交流电源串联的形式,可以看出,2 种工作模式下可以采用完全相同的控制流程。图中 3(a) 中 PLL 为锁相环,其输出的交流相位角参与坐标变换,对于电机驱动器,交流相位角由电机位置传感器得到,对于充电机,交流相位角由电网电压传感器得到。根据上文的分析可以得出结论,变流器 2 种工作模式下的电路结构和控制策略均相同,但在参数上存在以下区别:

(1) 2 种模式下的电阻、电感和交流电源串联结构中,电阻和电感值不同,交流电源的幅值和频率不同;

(2) 参与坐标变换的相位角生成方式不同,需要采用不同的传感器。

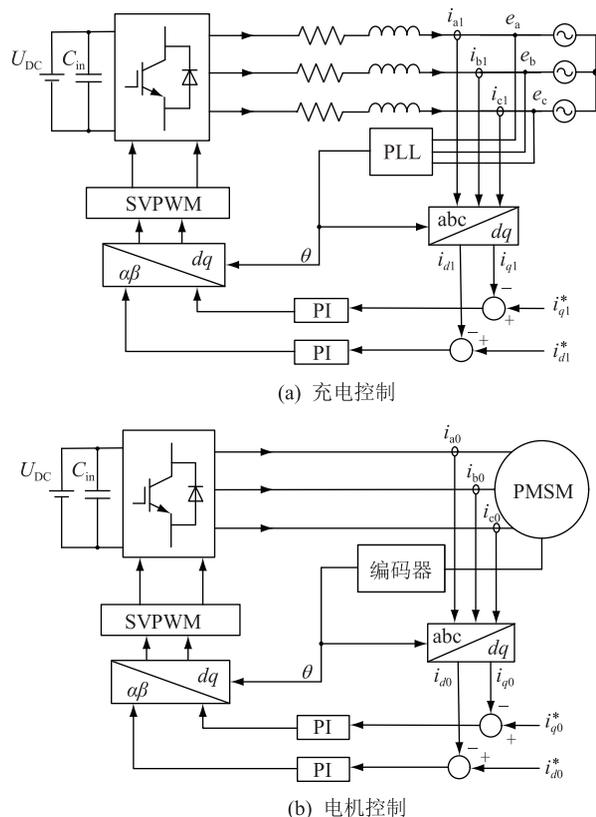


图3 矢量控制策略流程

Fig. 3 Diagram of vector control

对控制参数进行设计,需要建立电流环闭环传递函数,对于第一点区别,参数的差异仅会影响 2 种模式控制策略的传函系数,不会影响传递函数的结构;而对于第 2 种差异,由于传递函数在 dq 坐标系

下获得,相位角生成方式对传递函数没有影响。由此可得到2种模式下控制策略的电流环结构框图,如图4所示。

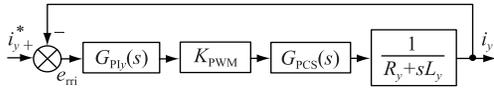


图4 电流环结构框图

Fig. 4 Structure diagram of the current loop

图中 $G_{ply}(s)$ 为电流环误差调节器的传递函数,即:

$$G_{ply}(s) = K_{py} + \frac{K_{iy}}{s} \quad (y = 0, 1) \quad (4)$$

式中: K_{py} 和 K_{iy} 分别为电流环误差调节器的比例和积分系数; K_{PWM} 为 PWM 调制环节传递系数,当电流反馈采样系数为 1 时, $K_{PWM} = 1$ 。 $G_{PCS}(s)$ 为变流器的传递函数,相当于一个比例延时环节,其表达式为:

$$G_{PCS}(s) = \frac{1}{0.5T_s s + 1} \quad (5)$$

式中: T_s 为采样周期。当采用同一套控制系统时,2种模式下的 $G_{PCS}(s)$ 和 K_{PWM} 相同。由此可以得到电流环闭环传递函数表达式为:

$$G_{cly}(s) = \frac{G_{ply}(s) G_{PCS}(s)}{R_y + sL_y + G_{ply}(s) G_{PCS}(s)} \quad (6)$$

化简得:

$$G_{cly}(s) = \frac{s + \frac{K_{iy}}{K_{py}}}{s^3 \frac{T_s L_y}{2K_{py}} + s^2 \frac{T_s R_y + 2L_y}{2K_{py}} + s \frac{R_y + K_{py}}{K_{py}} + \frac{K_{iy}}{K_{py}}} \quad (7)$$

可以看出,式中三阶系数远小于二阶系数,因此系统能够近似看作二阶系统,可以按照典型二阶系统进行电流环误差调节器的参数设计。

对比2种工作模式下的电路参数,电机绕组电感和定子等效电阻均大于充电机滤波电感和等效电阻,即 $L_1 < L_0, R_1 < R_0$ 。

为分析驱动与充电时电流的控制效果和动态响应特性,在相同的开关频率和控制参数下,忽略等效电阻的影响,做出不同电感值对应的电流环响应曲线($K_i/K_p = 1000$),如图5所示。可以看出,若共用一套控制参数,电机驱动工作模式下系统响应时间和超调量较大。

3 仿真验证

根据上述分析,搭建了基于 MATLAB/Simulink 的驱动充电一体化系统仿真模型,当采用同一套控

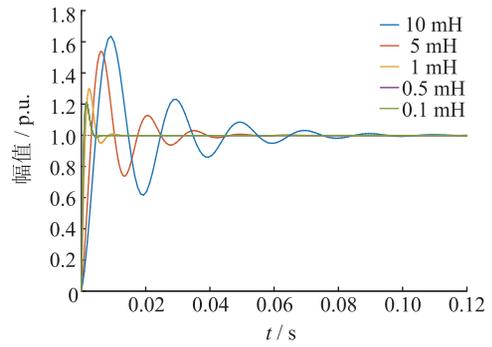
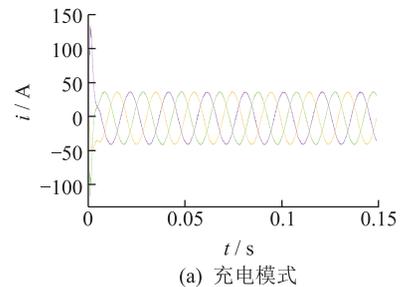


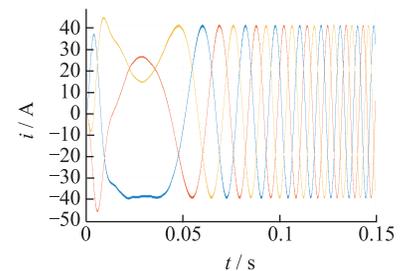
图5 电流环响应曲线

Fig. 5 Response curve of the current loop

制参数时,PMSM 和充电机的三相启动电流波形如图6所示,此时 $K_p = 2, K_i = 2000$ 。可以看出,电机驱动工作模式下系统响应时间相对充电模式下较大,而充电模式在启动时会有较大的冲击,是变流器固有特性导致的。



(a) 充电模式



(b) 电机驱动模式

图6 三相启动电流波形

Fig. 6 Three-phase starting current waveform

根据二阶系统设计方法重新设计参数,相关数据如表1所示。

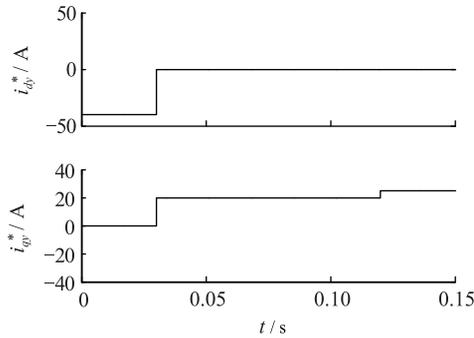
表1 一体化系统相关参数

Tab. 1 Parameters of the integration system

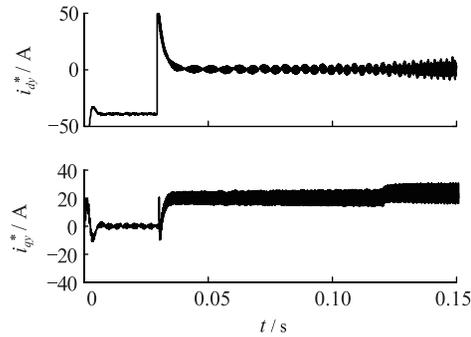
参数	数值	参数	数值
T_s/s	10^{-6}	K_{p0}	2
L_0/mH	6.4	K_{p1}	1.5
L_1/mH	5	K_{i0}	2000
R_0/Ω	2.84	K_{i1}	1800
R_1/Ω	0.5		

图7给出了矢量控制 dq 轴电流的变化情况,其中图7(a)所示为电流基准 $i_{d_y}^*$ 和 $i_{q_y}^*$ 的变化,在0.03 s

时,变流器由原本的充电模式切换为电驱动模式,即 0.03 s 之前 $i_{dy}^* = i_{d1}^*$, $i_{qy}^* = i_{q1}^*$, 0.03 s 之后 $i_{dy}^* = i_{d0}^*$, $i_{qy}^* = i_{q0}^*$, 在电驱动模式下, 0.12 s 时改变 i_{q0}^* , 相当于改变转矩。



(a) 电流基准的变化



(b) 电流反馈的变化

图7 dq轴电流的变化情况

Fig.7 Current change of the dq coordinate

图 7(b) 所示为电流基准 i_{dy} 和 i_{qy} 的变化, 电流反馈能够跟随电流基准, 在所设计的参数下, 电动汽车驱动充电一体化控制策略能够有效实现充电和驱动的切换和控制。

图 8 为电网侧电压和电流波形, 在 0.03 s 时, 变流器由电模式切换为电驱动模式, 因此, 在 0.03 s 之前, 电网电流与电压同频反相, 变流器工作在整流模式, 在 0.03 s 之后, 电网与一体化充电机断开。

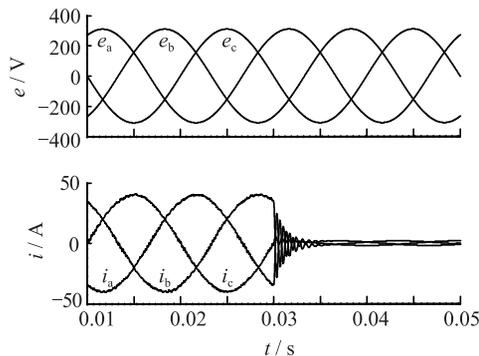


图8 电网侧电压和电流波形

Fig.8 Voltage and current of the grid side

图 9 给出了稳定后电机三相电流波形, 为三相

正弦波, 能够实现电机稳定运行。

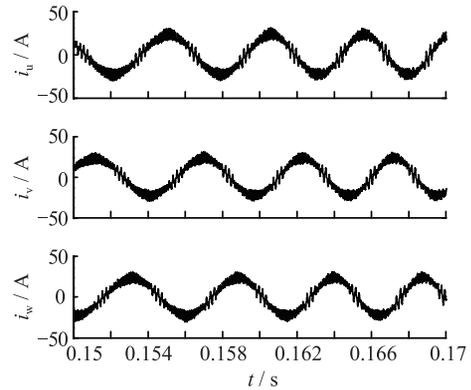


图9 PMSM 三相电流波形

Fig.9 Three-phase current of the PMSM

4 结论

文中以实现电动汽车驱动充电一体化为目标, 研究了驱动和充电 2 种工作模式下共用变流器工作原理, 并给出了统一的一体化控制策略, 讨论了 2 种工作模式下控制系统参数设计的异同点, 并推导出了统一的系统闭环传递函数, 从而进行控制系统参数设计, 在此基础上通过仿真验证了理论分析, 得到结论如下:

(1) 电动汽车驱动充电一体化能够通过共用变流器和控制系统实现, 减少了电动汽车体积和重量;

(2) 由于充电和驱动 2 种工作模式下电路等效参数不同, 因此 2 种工作模式下电流误差调节器的设计应采用不同的参数;

(3) 应用驱动充电一体化控制策略的系统能够实现工作模式的灵活切换, 应能够实现系统稳定可靠运行;

(4) 为避免增加车辆体积重量, 复用拓扑中的滤波器应安装在地面交流充电桩内, 后续研究将进一步优化电路结构, 并考虑用电机绕组电感进行滤波。

参考文献:

- [1] SALEHIFAR M, MORENO-EGUILAZ M, PUTRUS G, et al. Simplified fault tolerant finite control set model predictive control of a five-phase inverter supplying BLDC motor in electric vehicle drive [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 132: 56-66.
- [2] 韩华春, 丁 昊, 黄 地, 等. 面向主动配电网的电动汽车充放电功率控制技术[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 5. HAN Huachun, DING Hao, HUANG Di, et al. Electric vehicle power control strategy for active distribution network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 5.
- [3] 陈 庆, 魏丽君, 熊 异. 基于 DSP 和弱磁控制算法的纯电动汽车电机控制系统[J]. 微特电机, 2016, 44(5): 48

- 51.
CHEN Qin, WEI Lijun, XIONG Yi. Motor control system of pure electric vehicles based on DSP and the flux weakening control algorithm [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2016, 44(5): 48-51.
- [4] TENG J H, LIAO S H, WEN C K. Design of a fully decentralized controlled electric vehicle charger for mitigating charging impact on power grids [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(2): 1497-1505.
- [5] 刘东奇, 钟庆昌, 王耀南, 等. 基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 544-556.
LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. Electric vehicles based on synchronization inverter V2G intelligent charge and discharge control technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 544-556.
- [6] 管永高, 牛涛, 倪盼盼. 电动汽车直流充电桩接入对电网谐波的影响分析 [J]. *电力需求侧管理*, 2017, 19(3): 10-14.
GUAN Yonggao, NIU Tao, NI Panan. Study on the impact of electric vehicle DC chargers on power grid harmonics. *Power Demand Side Management*, 2017, 19(3): 10-14.
- [7] 高健勋. 纯电动汽车充电与驱动一体化研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
GAO Jianxun. The research based on the integration of the charging and driving of electric vehicle [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [8] 赵剑飞, 薛洋, 刘建波. 电动汽车用充电器与驱动器一体化拓扑研究 [J]. *电子器件*, 2016, 39(5): 1215-1219.
ZHAO Jianfei, XUE Yang, LIU Jianbo. Research on the integration of charger and driver for electric vehicle [J]. *Electronic Devices*, 2016, 39(5): 1215-1219.
- [9] 孙鹤旭, 张厚升, 井延伟. 电动汽车一体化驱动系统三相 3H 桥逆变器的故障相短接容错控制策略 [J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(11): 107-116.
SUN Hexu, ZHANG Housheng, JING Yanwei. Tolerant control strategy for 3H bridge inverter short circuit fault of electric vehicle integrated drive system [J]. *Electric Machines and Control*, 2016, 20(11): 107-116.
- [10] 刘莹, 王辉, 漆文龙. 电动汽车驱动系统与蓄电池充电一体化混合拓扑研究综述 [J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(10): 143-149.
LIU Ying, WANG Hui, QI Wenlong. Summary of integrated topology of EV traction system and battery charging system [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(10): 143-149.
- [11] HAGHBIN S, KHAN K, LUNDMARK S, et al. Integrated chargers for EV's and PHEV's; examples and new solutions [C] // *Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on IEEE, 2010: 1-6.
- [12] 李为汉. 含电机绕组的电动汽车 Z 源一体化充电机研究初探 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
LI Wei Han. Including motor winding of the electric car charger Z source integration research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [13] 孙鹤旭, 张厚升. 电动汽车驱动一体化系统牵引模式下逆变器的开路容错控制策略 [J]. *电测与仪表*, 2016, 53(17): 34-38.
SUN Hexu, ZHANG Housheng. A novel tolerant control strategy for the inverter of the EV integrated traction system.
- [14] 杨刚, 杨奇逊, 张涛, 等. 微网中双向 DC-AC 变流器的性能优化控制 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(7): 81-91.
YANG Gang, YANG Qixun, ZHANG Tao, et al. Improvement control of dual-direction DC-AC converters for microgrids [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(7): 81-91.
- [15] 张军, 韩华春, 原增泉. 基于两级充电管理系统的电动汽车智能充电控制系统研究 [J]. *电力工程技术*, 2017, 36(5): 86-92.
ZHANG Jun, HAN Huachun, YUAN Zengquan. Smart charging control electrical vehicles based on two-level charge management system [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(5): 86-92.
- [16] 李生民, 韩钊, 余雷. 电动汽车双向变换器快速充电仿真研究 [J]. *计算机仿真*, 2016(7): 223-228.
LI Shengmin, HAN Zhao, YU Lei. The simulation research on the fast charge of electric vehicle bidirectional converter [J]. *Computer Simulation*, 2016(7): 223-228.
- [17] HU Y, SONG X, CAO W, et al. New SR drive with integrated charging capacity for plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(10): 5722-5731.
- [18] AHMED I, BORGHATE V B, MATSA A, et al. Simplified space vector modulation techniques for multilevel inverters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(12): 8483-8499.
- [19] 张婧, 周孔均. 重庆市新能源汽车发展现状及对策建议 [J]. *电力需求侧管理*, 2017, 19(1): 58-59, 64.
ZHANG Jing, ZHOU Kongjun. Status and suggestions for the development of new energy vehicle industry in Chongqing [J]. *Power Demand Side Management*, 2017, 19(1): 58-59, 64.
- [20] 巫志平. 分布式电动汽车充电设施建设及推广 [J]. *电力需求侧管理*, 2016, 18(03): 50-53.
WU Zhiping. Analysis of the problems of electric vehicle charging facilities construction and promotion [J]. *Power Demand Side Management*, 2016, 18(03): 50-53.

作者简介:



高峰

高峰(1964—),男,本科,高级工程师,从事电力自动化相关工作(E-mail: tanyun@163.com);

谈韵(1969—),女,本科,高级工程师,从事电力自动化相关工作;

陶远鹏(1969—),男,本科,高级工程师,从事电力自动化相关工作。

(下转第 113 页)

Analysis of Phase Distance of Transmission Line Based on Improved PSO Algorithm

LU Bin, ZHAO Xinyu, ZHANG Ruiyong, MA Jun, ZHU Yuan

(China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In order to solve engineering problem with the minimum phase distance of approach span, this paper establishes 3D mathematical method with every dot on the transmission line. The study can calculate the minimum phase distance based on the improved PSO algorithm quickly and accurately. It also analyzes the relationship between the minimum phase distance and the distance of the approach span, conductor tension, level difference on the MATLAB simulation. The simulation results show that with the increasing of span, the minimum phase spacing increases rapidly and then slow down; the minimum phase has a decrease with the conductor tension increased; the minimum phase decreases rapidly with the increase of level difference. At last, this paper points out that the sensitive factors have a critical value. If the sensitive factors exceed the critical value, the minimum phase can't be substandard.

Key words: phase distance; MATLAB; improved PSO algorithm; approach span

(编辑 方 晶)

(上接第 77 页)

Research on the Integrated Control Strategy of Electric Vehicle Driving and Charging

GAO Feng¹, TAN Yun¹, TAO Yuanpeng¹, XU Zhufa¹, LI Xiaofei¹, ZHENG Xinxin²

(1. State Grid Hefei Power Supply Company, Hefei 230009, China;

2. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: At present, the electric vehicle driver and charger are independent of each other. It would take up amount of space and increase the weight. In order to solve the problem, the integrated converter and its control strategy are studied in this paper. The main power circuit of the driver and charger share a three-phase bridge AC / DC converter. It can realize bidirectional energy transfer. The working principle of the integrated converter under driving and charging modes are proposed. The vector control strategy under two working conditions is analyzed. A unified current control structure is obtained through comparative study. The integration of driver and charger can be realized. The space and weight of the electric vehicles can be saved. The influence of control parameters on the current loop performance is also discussed. Finally the theoretical analysis are verified by the simulation results.

Key words: electric vehicle; electric driving; charging; vector control

(编辑 钱 悦)

(上接第 107 页)

Research on Voltage Sag Event Classification and Short Circuit Type Identification

ZHANG Chenyu¹, SHI Mingming¹, FAN Zhong², ZHENG Jianyong³, YUAN Xiaodong¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China ;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the rapid development of modern power electronic devices and the rapid development of the new type of power load, the problem of power quality is paid more and more attention. In order to study the voltage sags better impact on the power system, firstly, according to the source voltage sag event classification, including the main source of short-circuit fault, large motor starting and lightning, then the voltage sags caused by short circuit fault identification, can make the voltage sag monitoring system according to the waveform recognition a fault type. Finally, through the case analysis of the data waveform of the voltage sag monitoring system in Jiangsu power grid, the paper classifies the four kinds of typical short circuit faults, and verifies the feasibility of the algorithm.

Key words: voltage sag; type identification; short circuit fault; classification

(编辑 钱 悦)