

文章编号:1671-251X(2019)01-0104-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018060011

矿用电机车车载充电系统研究

杨金鑫, 祝龙记

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:针对现有矿用铅酸蓄电池电机车充电系统存在电能质量差、续航能力小、蓄电池使用寿命短、蓄电池充电装置与电机车驱动系统分离等问题,设计了一种新型一体化车载充电系统。该系统由前级 PWM 整流电路和后级 Buck 电路串联组成,充电时将电动机绕组重构为 PWM 整流电路的升压电感,组成一体化车载充放电电路;采用超级电容代替蓄电池作为储能元件,可实现车载快速充放电功能。仿真结果表明,与传统充电系统相比,该系统充电时间短、效率高,可实现功率因数校正、抑制纹波、高效快速充放电等功能。

关键词:矿用电机车;永磁同步电动机;绕组重构;车载充电;一体化充放电电路;超级电容

中图分类号:TD611 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20181228.1005.001.html>

Research on on-board charging system of mine-used electric locomotive

YANG Jinxin, ZHU Longji

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of
Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract:In view of problems of low power quality, low cruising power, short service life of battery, separation between battery charging device and locomotive driving system existed in current charging system of mine-used electric locomotive with lead-acid battery, a new integrated on-board charging system was designed. The system is composed of the front-stage PWM rectifier circuit and the back-stage Buck circuit in series. When charging, the motor windings are reconstructed into the boost inductance of the PWM rectifier circuit to form an integrated on-board charging and discharging circuit. The supercapacitor is used to replace the battery as the energy storage element, which can realize quick on-board charging and discharging function. The simulation results show the system has shorter charging time and higher efficiency, and can realize functions such as power factor correction, ripple suppression, efficient and rapid charging and discharging compared with the traditional charging system.

Key words: mine-used electric locomotive; permanent magnet synchronous motor; winding reconstruction; on-board charging; integrated charging and discharging circuit; supercapacitor

0 引言

目前,矿山运输中使用较多的是矿用铅酸蓄电池电机车,其以直流电动机作为驱动电动机,虽然牵引性能良好,启动转矩较大,但启动方式是串电阻启动,启动过程会消耗大量电能,需经常对其进行充

电^[1]。现有的矿用铅酸蓄电池电机车充电系统主要由三相电源、充电电路和储能元件(铅酸蓄电池)组成。其中,充电电路为晶闸管相控整流电路,整流得到的直流电中含有大量纹波,电能质量差;以铅酸蓄电池作为储能元件,功率密度低,寿命短,且铅酸蓄电池与车身通过插销连接,充电时需要从电机车上

收稿日期:2018-06-06;修回日期:2018-11-25;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1610120)。

作者简介:杨金鑫(1994—),男,安徽淮南人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术及应用,E-mail:1754599554@qq.com。

引用格式:杨金鑫,祝龙记.矿用电机车车载充电系统研究[J].工矿自动化,2019,45(1):104-108.

YANG Jinxin,ZHU Longji. Research on on-board charging system of mine-used electric locomotive[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 104-108.

拆卸下来运到专用充电机房进行充电,充电过程费时费力,大大降低了工作效率^[2]。

针对目前矿用电机车充电系统中充电电路和储能元件存在的问题,设计了一套矿用电机车车载充电系统。用功率密度大、能快速充放电、寿命长、适用于大功率、大电流场合^[3-5]的超级电容代替铅酸蓄电池,并且固定在电机车上,充电时无须拆卸;用体积小、能耗低、启动转矩大、调速范围宽的永磁同步电动机^[6]代替直流电动机,永磁同步电动机定子绕组简单重构后,作为PWM整流电路中的升压电感,使其能直接连接电源进行充电;用一体化车载充放电电路代替晶闸管相控整流电路,采用更优的PWM整流控制策略代替相控整流控制策略,以达到提高单位功率因数、输出高质量电能的目的。

1 矿用电机车车载充电系统

矿用电机车车载充电系统主要由三相交流电源、PWM整流电路、Buck斩波电路及超级电容组成,如图1所示。三相交流电源提供电能,经过PWM整流电路整流后,得到高质量的直流电。但经过整流得到的直流电电压过高,直接对超级电容充电可能会损坏器件,需要Buck斩波电路进一步把电压降低到合适的值后再对超级电容充电。

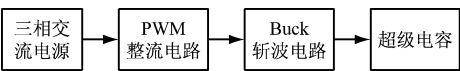


图1 矿用电机车车载充电系统组成

Fig.1 Composition of on-board charging system of mine-used electric locomotive

2 充电放电一体化电路结构

2.1 一体化电路

矿用电机车充电放电一体化电路如图2所示,其有2种工作模式:充电模式和放电(驱动)模式。图2中,SC为储能超级电容组,VT₇、VD₈及L组成充电电路中的Buck电路,C为滤波稳压电容。VT₁—VT₆组成双向变换器,在驱动模式下作为逆变器使用,在充电模式下作为整流器使用。KM是电磁接触器,开关触点连接在电动机的定子绕组上。在驱动模式下,L_A、L_B、L_C分别与KM-2端子连接,定子三相绕组连接成星形,永磁同步电动机工作于电动运行状态。充电模式下,控制KM线圈得电,开关触点KM-1闭合,L_A、L_B、L_C被KM-1接入三相交流电源u_A、u_B、u_C,电动机三相绕组变成了PWM整流电路中的升压储能电感L_A、L_B、L_C。

2.2 定子特殊绕组通电对转子的影响

在充电状态下,定子三相绕组开关断开,变成

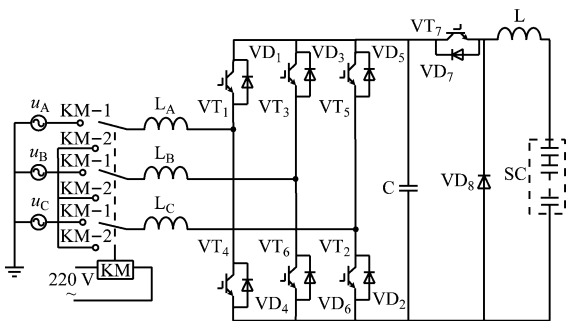
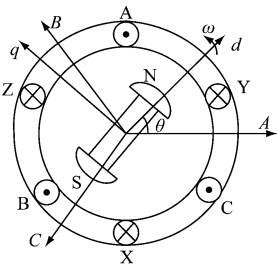


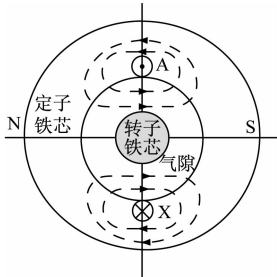
图2 充电放电一体化电路

Fig.2 Integrated circuit for charge and discharge

3个独立的电感。当独立的定子绕组电感L_A、L_B、L_C分别通入交流电压u_A、u_B、u_C时,定子每相绕组电感在其周围产生磁场。电动机定子结构中,三相绕组AX、BY、CZ(A、B、C是出线端,X、Y、Z是进线端)沿圆周呈对称分布。在充电模式下,三相绕组两两断开,通电后会在其周围产生磁场,按右手螺旋定则规定绕组轴线的正方向,将这3个方向作为空间坐标轴的轴线,建立ABC三相静止坐标系。同时根据转子永磁体磁极轴线d轴及与其垂直的方向确定dq平面直角系,定子绕组分布及坐标系如图3(a)所示。以A相绕组为例,分析通电产生的磁场对转子的影响。A相绕组的A端和X端产生的磁场分布如图3(b)所示,A相绕组A端电流从纸面流向纸外,X端电流从纸外流向纸面。从图中可以看出,S极与A轴正方向重合。此时,对于转子来说,A端和X端产生的空间磁场在其上产生的作用力大小相等、方向相反,永磁体此时受力平衡,转子上转矩为零,转子静止。



(a) 定子绕组及坐标分布



(b) A相绕组的A端和X端产生的磁场分布

图3 定子绕组通电分析

Fig.3 Analysis of electrify of stator winding

同理可得 B 相、C 相通电时转子的转矩也为零，转子静止。

2.3 放电电路

当接触器 KM 处在驱动模式下时， L_A 、 L_B 、 L_C 的 XYZ 端由 KM 开关触点连接在一起，形成永磁同步电动机的三相绕组，得到如图 4 所示的放电电路。超级电容器工作在放电状态，电能通过 VD_7 和三相电压型逆变器后转换成永磁同步电动机的机械能，电机车工作在电动运行状态。

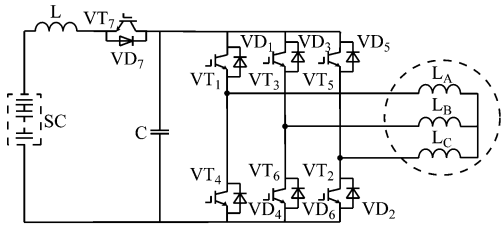


图 4 放电电路
Fig.4 Circuit of discharge

2.4 充电电路

当一体化充放电电路在充电模式时，其电路如图 5 所示。其中， L_A 、 L_B 、 L_C 的 XYZ 端由 KM 接触器控制分开，分别连接到三相交流电源上，与三相逆变器一起组成 PWM 整流电路。充电电路采用两级式充电结构，前一级主要由三相交流电 u_A 、 u_B 、 u_C 、升压储能电感 L_A 、 L_B 、 L_C 及 PWM 整流桥组成；后级电路主要是 Buck 电路，由 VT_7 、续流二极管 VD_7 、电感 L 组成，主要用来控制超级电容器的充电电流。

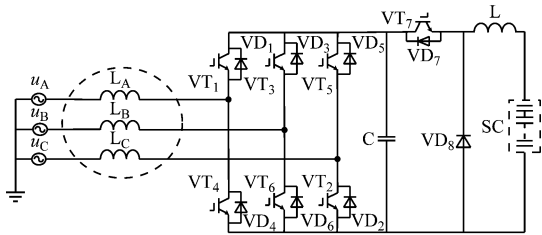


图 5 充电电路
Fig.5 Circuit of charging

3 充电控制策略

采用三相 PWM 整流代替传统电机车的相控整流，解决了相控整流电路中存在大量谐波的问题，可提高单位功率因数^[7-10]。

3.1 PWM 整流控制策略

一体化车载充电电路中的三相 PWM 整流的控制策略是基于 dq 旋转坐标的双闭环控制，即电压电流双闭环和电压前置反馈相结合。双闭环控制中，电压环是外环，电流环是内环。电压前置反馈目的是输出稳定直流电，双闭环控制目的是实现单位

功率因数。

在 dq 旋转坐标系下，三相交流电 u_A 、 u_B 、 u_C 的电压方程为

$$\begin{cases} u_{Ld} = L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega i_{Lq} + u_{ld} \\ u_{Lq} = L \frac{di_{Lq}}{dt} - \omega i_{Ld} + u_{lq} \end{cases} \quad (1)$$

式中： u_{Ld} 、 u_{Lq} 、 u_{ld} 、 u_{lq} 分别表示 dq 坐标系下电网电压和整流器交流侧输入电压； i_{Ld} 、 i_{Lq} 为电感电流； L 为绕组电感； ω 为电源角频率。

根据式(1)，输入整流器的有功功率 P 和无功功率 Q 分别为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_{Ld}i_{Ld} + u_{Lq}i_{Lq}) \\ Q = \frac{3}{2}(u_{Lq}i_{Lq} - u_{Ld}i_{Ld}) \end{cases} \quad (2)$$

为实现单位功率因数，无功分量 $Q=0$ ，则 i_{Lq} 、 u_{Lq} 都为零，式(2)可简化为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}u_{Ld}i_{Ld} \\ Q = 0 \end{cases} \quad (3)$$

电压前置反馈的是直流输出侧的电压 u_{dc} ，电流环反馈的是 dq 旋转坐标系下的电感电流 i_{Ld} 、 i_{Lq} 。控制量 u'_{d-ref} 、 u'_{q-ref} 的表达式为

$$\begin{cases} u'_{d-ref} = u_{Ld} - L \frac{di_{Ld}^*}{dt} + \omega L i_{Lq} \\ u'_{q-ref} = u_{Lq} - L \frac{di_{Lq}^*}{dt} - \omega L i_{Ld} \end{cases} \quad (4)$$

根据前述分析，得到矢量控制结构，如图 6 所示。

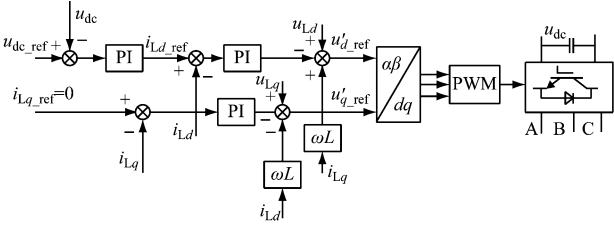


图 6 dq 解耦矢量控制结构

Fig.6 Structure of dq decoupling vector control

3.2 Buck 电路控制策略

Buck 电路由 VT_7 、续流二极管 VD_7 、电感 L 组成，主要对超级电容器进行充电控制。Buck 电路控制策略采用 PWM 电压、电流双闭环控制^[11]。电流环是内环，电压环是外环。采用双闭环控制是为了保证恒流高效充电的同时限制最终的充电电压，Buck 电路控制原理如图 7 所示。图 7 中， u_{ref} 为外部给定电压， i_{L-ref} 为给定充电电流， $G_{id}(s)$ 为占空比扰动对电感电流 $i_L(s)$ 的影响， i_L 为流过电感的电流， k_i 为电流比例系数， $G_{vi}(s)$ 为电感电流扰动 $i_L(s)$

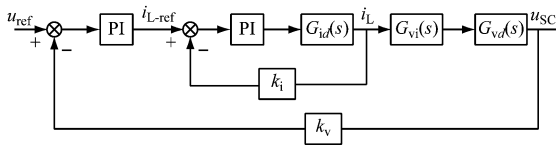


图7 Buck电路控制原理

Fig. 7 Control principle of Buck circuit

对超级电容电压 $u_{sc}(s)$ 的影响, $G_{vd}(s)$ 为占空比扰动 $d(s)$ 对超级电容电压 $u_{sc}(s)$ 的影响, k_v 为电压比例系数。

占空比扰动 $d(s)$ 对电感电流 $i_L(s)$ 扰动的传递函数为

$$G_{id}(s) = \frac{U_i C_{sc} s}{LC_{sc} s^2 + R_{es} C_{sc} s + 1} \quad (5)$$

占空比扰动 $d(s)$ 对超级电容电压 $u_{sc}(s)$ 的扰动传递函数为

$$G_{vd}(s) = \frac{U_i (1 + R_{es} C_{sc} s)}{LC_{sc} s^2 + R_{es} C_{sc} s + 1} \quad (6)$$

电感电流扰动 $i_L(s)$ 对超级电容电压 $u_{sc}(s)$ 的扰动传递函数为

$$G_{vi}(s) = \frac{1 + R_{es} C_{sc} s}{C_{sc} s} \quad (7)$$

式中: C_{sc} 为超级电容组容量; R_{es} 为超级电容组等效内阻; U_i 为 Buck 电路输入电压。

超级电容充电电流的大小决定于其储存电量的大小。充电过程中电流与电量关系如图 8 所示。根据监测到的 SOC% (State of Charge) 值, 将充电分为 5 个阶段。在 $0 \sim t_1$ 阶段, 为了避免突加大电流对超级电容器造成的冲击, 电流从零开始上升, 逐渐达最大值, SOC% 开始增加; 在 $t_1 \sim t_4$ 阶段, 保持大电流快充, SOC% 快速升高至 70%; 在 $t_4 \sim t_5$ 阶段, 电流逐渐降低, 电量增速变慢直至 SOC% 为 80%; 在 $t_5 \sim t_8$ 阶段, 再次降低充电电流, 直至电量接近 100%, 在充电初期和中期, 电压外环处在饱和状态不起作用, 主要由电流环来控制; 在 $t_8 \sim t_9$ 段, 快充满时, 电压外环退出饱和, 实现电压控制, 充电电流逐渐降低, 转入恒压浮充阶段。这种控制策略可以实现对超级电容的高效、安全充电。图中, $i_1 \sim i_{10}$ 代表 SOC% 达到 10%~100% 时对应的充电电流的大小。

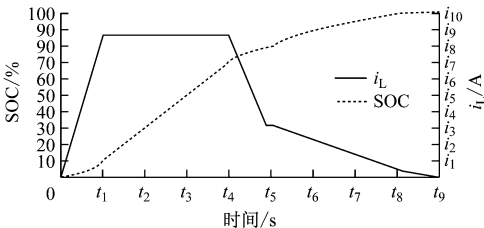


图8 充电过程中的电流与电量关系

Fig. 8 Relation between current and electric quantity in charge process

4 仿真与分析

为了验证矿用电机车车载充电系统的可靠性, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建了充电系统仿真模型。超级电容模组选择 MUCK24V2870 能量型的超级电容模组。若电机车的蓄电池储能容量为 16 kW·h, 改为超级电容模组后, 端电压取 300 V, 其容量可按式(8)计算。

$$P_{sc} = \frac{\frac{1}{2} C_{sc} U_{sc}^2}{3\ 600} \quad (8)$$

式中 P_{sc} 为矿用超级电容用电机车储能容量, 计算后得到容量为 1 250 F。

接入电网三相交流电后, 电动机绕组与电网连接, 定子绕组作为升压电感使用。接入三相电, 电动机由静止状态转换到充电模式。充电过程分为 2 步: 第 1 步是采用 PWM 整流技术将电网的三相交流电整流成合适的直流电, 第 2 步是控制斩波电路对超级电容充电。

一体化充电电路的转子转速波形如图 9 所示。从图 9 可知, 在充电开始时的 0.2 s 内, 转子有很低的转速, 0.2 s 后, 转速变为零, 转子静止, 说明在充电状态下, 转子没有转速, 电动机处于安全稳定状态。

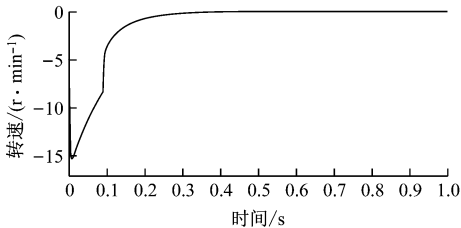


图9 一体化充电电路的转子转速波形

Fig. 9 Waveform of rotor speed of integrated charging circuit

电网侧电压、电流曲线如图 10 所示, 经过很短的时间, 电压、电流的相位就达到了同步, 实现了单位功率因数, 可输出高质量直流电。

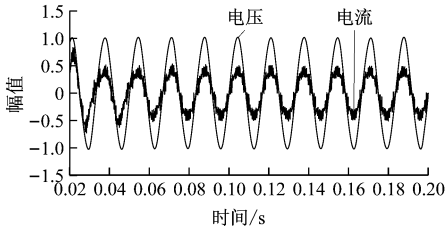


图10 电网侧电压、电流曲线

Fig. 10 Voltage and current curve at grid side

充电电流曲线如图 11 所示。为了避免突加电流冲击超级电容器, 在充电前期, 从零开始逐渐增加电流, 2 s 后, 电流达到最大值, 保持充电电流不变。22 s 后, 电量达到 70%, 此时, 降低充电电流。26 s

后,电量达到 80%,再次降低充电电流,进入慢充阶段,持续 22 s。48 s 后,转入恒压充电,电流逐渐降为零,充电完成。图 11 说明了超级电容的充电电流范围大,既可大电流快速充电,也可以小电流浮充,整个充电过程大概需要 50 s。

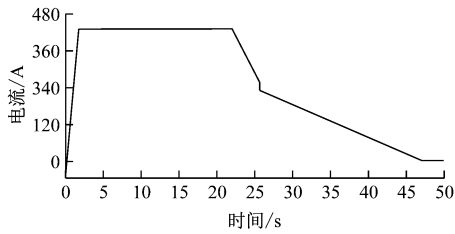


图 11 充电电流曲线

Fig. 11 Charging current curve

超级电容电量曲线如图 12 所示,充电开始到结束时间大概需要 50 s,充电时间远远小于蓄电池充电的时间,反映出超级电容快速充电的特性。

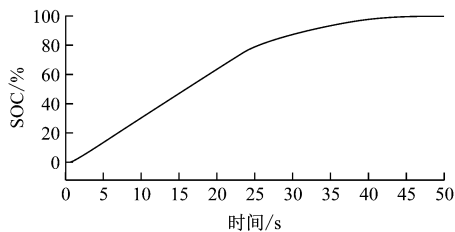


图 12 超级电容电量曲线

Fig. 12 Curve of electric quantity of supercapacitor

5 结语

矿用电机车车载充电系统采用三相 PWM 整流电路与 Buck 电路串联电路代替传统的相控整流电路,用永磁同步电动机代替传统的直流电动机,对定子绕组进行简单重构,重构后定子绕组变成普通电感,作为 PWM 整流电路中的升压电感,储能元件采用性能更好的超级电容,实现了车载快速充放电功能。仿真分析结果表明,该充电系统能够实现功率因数校正、抑制纹波、高效快速充放电等功能,满足矿用电机车的使用要求。

参考文献(References):

[1] 李振璧,石晓艳.基于 DSP 控制的蓄电池电机车直流斩波调速系统[J].煤矿机电,2007(2):26-28.
LI Zhenbi, SHI Xiaoyan. DC chopped-wave speed regulating system of battery locomotive based on DSP control [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2007(2): 26-28.

[2] 王栋梁,温灿国.锂离子蓄电池在矿用电机车上的应用[J].矿山机械,2011,39(4):40-43.
WANG Dongliang, WEN Canguo. Application of lithiumion batteries to mining electric locomotives [J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(4): 40-43.

[3] 那凯鹏,刘国忠,杨宇飞.超级电容充电方法研究[J].电子设计工程,2014,22(22):91-93.
NA Kaipeng, LIU Guozhong, YANG Yufei. Study on charging method of supercapacitor[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(22): 91-93.

[4] 彭波,文方.超级电容的充放电控制策略研究[J].工业控制计算机,2013,26(12):138-139.
PENG Bo, WEN Fang. Supercapacitor charge and discharge control strategy[J]. Industrial Control Computer, 2013, 26(12): 138-139.

[5] 孟彦京,张商州,陈景文,等.充电方式对超级电容能量效率的影响[J].电子器件,2014,37(1):13-16.
MENG Yanjing, ZHANG Shangzhou, CHEN Jingwen, et al. The impact of charging mode pairs of super-capacitor energy efficiency [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(1): 13-16.

[6] 李永东,朱昊.永磁同步电机无速度传感器控制综述[J].电气传动,2009,39(9):3-10.
LI Yongdong, ZHU Hao. Overview of sensorless control of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Drive, 2009, 39(9): 3-10.

[7] 刘金海,陈为,胡金高.永磁同步电机 dq 电感参数新实验获取法[J].电工技术学报,2014,29(7):97-103.
LIU Jinhai, CHEN Wei, HU Jingao. Novel experimental methods of acquiring dq inductance of permanent magnet synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 97-103.

[8] FENG Yuelu, KONISHI Y, NAKAOKA M. Deadbeat control scheme for three phase current-fed PFC converter with an optimum PWM strategy [C]//IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1999:485-488.

[9] VEENA V S, M H RAVICHANDRAN, SADASIVAN A, et al. Vector control of three phase PMSM drive using power transformations for future spacecraft application [C]// 2014 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, 2014:313-318.

[10] BIWETA M, MAMO M. Closed loop control strategy of back to back PWM converter fed by PMSG using plects toolbox on Matlab/Simulink for wind energy application [C]// IEEE African 2017 Proceedings, 2017:1313-1318.

[11] WANG Xiaoyu, LIU Jinjun, MENG Yuji, et al. Frequency-domain transformation approaches to develop the d-q synchronous-frame models of three-phase symmetrical networks and applications in modeling of PWM power converters [C]// The 7th International Conference on Power Electronics, 2007: 851-856.