

超级电容储能系统的状态识别与动态控制设计^{*}

宋朝锋¹, 张红娟¹, 靳宝全², 高妍¹, 任璐¹

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 根据变频器母线电流在电机运行于加载和制动时的不同特征, 通过采集变频器母线电流实时监测电机运行状态, 设计了双向 DC/DC 变换器模式切换与控制器通断控制电路, 实时识别电机运行状态, 实现对储能单元在线动态控制。通过搭建 550 W 的储能系统试验平台, 验证了所设计状态识别与控制电路的合理性。

关键词: 制动能量; 超级电容储能单元; 电机运行状态监测; 双向 DC/DC 变换器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)05-0020-05

State Recognition and Dynamic Control Design of Super Capacitive Energy Storage System^{*}

SONG Chaofeng¹, ZHANG Hongjuan¹, JIN Baoquan², GAO Yan¹, REN Lu¹

(1. College of Electrical & Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: According to the different characteristics of the DC bus current of the inverter when the motor was running in loading or braking, the operation state of the motor was monitored in real time by collecting the DC bus current of the inverter, and a bidirectional DC/DC converter mode switching and controller on-off control circuit was designed to realize the online dynamic control of the energy storage unit. A 550 W energy storage system experimental platform was built and the rationality of the designed state identification and control circuit was verified.

Key words: braking energy; super capacitor energy storage unit; judgment of motor operating status; bi-directional DC/DC converter

0 引言

随着传统化石能源(如石油、煤炭、天然气等)的迅速消耗,我国面临着越来越严重的环境问题和能源危机,节能降耗成为各工矿企业面临的一个重要课题。在电力行业,电机耗电约占全国电力消费的 64%,其中工业耗电领域,电机能耗达 75% 以上^[1],而电机在工业运行中,通常需要频繁的启动和制动,因此存在大量的再生制动能量^[2]。目前,工业中交流电机普遍应用能耗制

动^[3-4],将电机制动时产生的电能经由电阻以热能的形式耗散掉,造成能量的巨大浪费。为实现电机制动时产生的能量可以二次利用,本文采用超级电容作为储能单元吸收其制动能量^[5-7],并在电机启动或加载时再将释吸收的能量放出来以达到稳定电网电压、抑制电网谐波、节能环保的作用^[8-9]。然而,整个系统要实现制动能量可靠的回收和再利用,必须实时在线监测电机运行的状态,准确判断出电机的加载和制动过程,从而合理控制超级电容充电与放电^[10-11]。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51405330);山西省科技重大专项项目(MJ2016-01)

作者简介: 宋朝锋(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电气节能技术。

张红娟(1974—),女,教授,研究方向为变频节能控制技术,新型电力电子技术及装置,电力变换技术及应用。

本文通过采集变频器母线电流实时监测电机运行状态,根据变频器母线电流在电机运行于加载和制动时的不同特征^[12-14],作为储能系统制动能量回收与再利用的判断依据。设计了一种将母线电流信号转化为双向 DC/DC 变换器模式切换信号和控制器通断信号的状态识别与控制电路,此电路对于各类变频驱动系统中电机运行状态识别具有重要参考意义。

1 储能系统总体设计

目前交流电机驱动系统的调速方式主要采用交-直-交变频调速,即先把工频交流电源整流成直流电源,直流电源再通过逆变装置转换成频率、电压均可调控的交流电源提供给电机。本文采用超级电容作为储能单元,回收和再利用电机驱动系统中的制动能量,并通过双向 DC/DC 变换器实现超级电容与负载端能量双向流动与转换。交流电机变频调速储能系统总体结构图如图 1 所示。

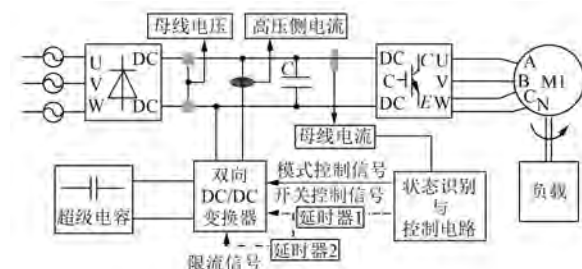


图 1 交流电机变频调速储能系统总体结构图

2 储能系统工作原理

本文中所设计的储能系统主要有 3 种工作模式,如图 2 所示。各模式工作情况的详细描述如下。

2.1 制动能量回收模式

在变频调速系统中,交流电机运行于突然减速或制动停机状态时,电机转速会短时低于机械负载的转速($n_1 < n_2$)。此时,电机为异步发电工作状态;电机产生的制动能量通过逆变器回馈到变频器直流母线上,由于母线滤波电容 C 的存在,母线电流会反向,通过状态识别与控制电路,将此反向母线电流信号判断为制动信号,对双向 DC/DC 变换器发出 Buck 模式和控制启动信号,完成对交流电机制动能量的快速回收。该制动能量回收模式示意图如图 2(a) 所示。

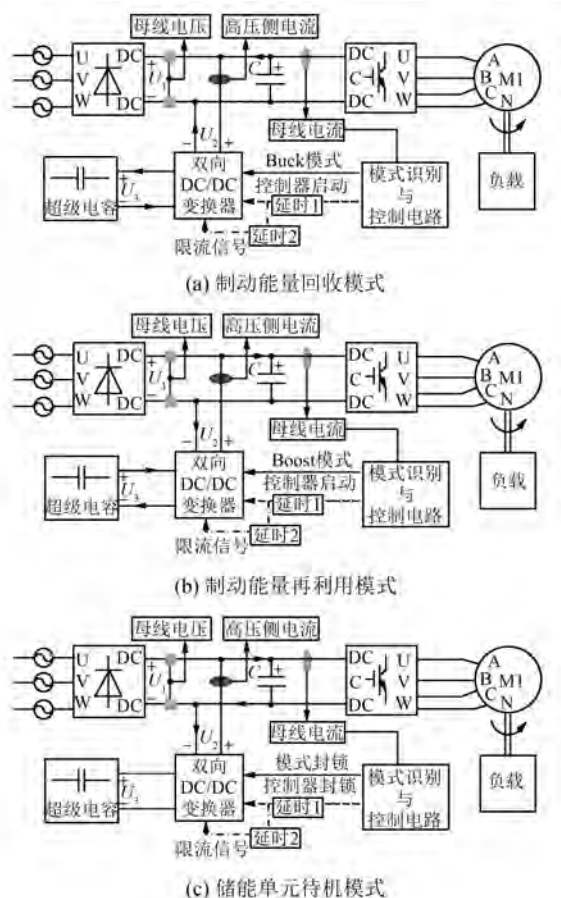


图 2 储能系统主要工作模式

2.2 制动能量再利用模式

交流电机突然起动或加速、加载时,变频器母线电流会明显变大,当母线电流值大于所设定阈值时,通过状态识别与控制电路,将此母线电流信号判定为加载信号,对双向 DC/DC 变换器发出 Boost 模式和控制启动信号,完成对储能单元所存制动能量的快速释放。该制动能量负载侧再利用模式示意图如图 2(b) 所示。

2.3 储能单元待机模式

储能单元待机模式是指交流电机工作于正常电动状态,此时母线电流既不反向,也不大于所设定阈值,电机 M1 拖动负载工作,所需能量由网侧提供,状态识别与控制电路对双向 DC/DC 变换器发出模式封锁信号,储能系统不工作。其示意图如图 2(c) 所示。

3 状态识别与控制电路设计

状态识别与控制电路的设计原则是动态的控

制双向 DC/DC 变换器模式切换与控制器开通、关断。其结构图如图 3 所示。

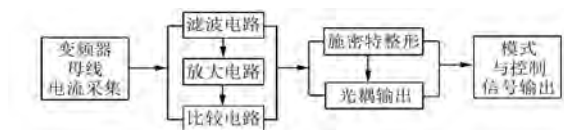


图 3 状态识别与控制电路结构图

3.1 变频器母线电流采集

本文采用高精度霍尔电流传感器采集母线电流,响应时间 $\leq 0.3\text{ ms}$,可将 $0\sim 10\text{ A}$ 母线电流信号转化为 $0\sim 4\text{ V}$ 电压信号,线性度 $\leq 0.2\%\text{ FS}$ 。

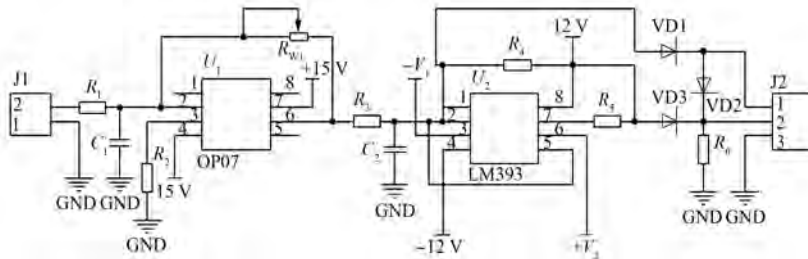


图 4 放大与比较电路结构图

3.3 整形与光耦输出电路

LM393 比较器输出控制信号直接作变频器控制信号时,存在双向 DC/DC 变换器频繁开通与切换模式的现象,通过对 LM393 比较器输出控制信

3.2 放大与比较电路

霍尔电流传感器采集到的电流信号经过 RC 低通滤波滤除高频噪声后,传递给放大器模块。本文放大模块采用低失调、高增益特性的 OP07 芯片。放大后的母线电流信号经由 LM393 比较器与所设定的 $-V_1$ 和 $+V_2$ 比较,若大于 $+V_2$,则判定为制动信号,输出口 J2-2 高电平, J2-1 低电平;若小于 $-V_1$,则判定为加载信号,输出口 J2-2 高电平, J2-1 高电平;若位于 $-V_1$ 和 $+V_2$ 之间,则 J2-2 低电平, J2-1 低电平,双向 DC/DC 变换器封锁,其电路原理图如图 4 所示。

号波形分析,原因为高频谐波由上升沿和下降沿抖动引起。针对此问题,采用低通滤波、555 整形和光耦隔离处理比较器输出控制信号,所设计整形与光耦输出电路原理图如图 5 所示。

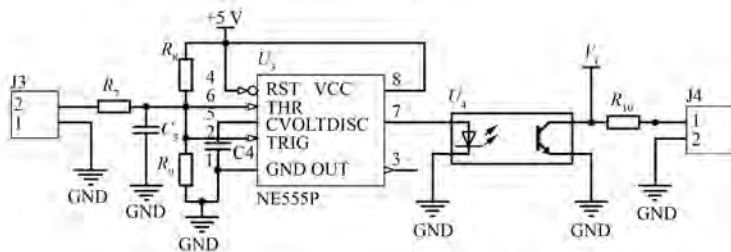


图 5 整形与光耦输出电路结构图

3.4 模式与控制信号输出设计

3.4.1 延时器 1 设定

本文采用的双向 DC/DC 变换器主拓扑结构为交错并联型。当双向 DC/DC 变换器同时接收到模式切换和控制板开通信号时,可能存在同一桥臂上下管同时导通^[11],导致短路,因此需对控制器开通信号做适当延时,即增加图 1 中延时器 1。本文通过查阅 IGBT 手册,将延时器 1 设定为延时 10 ms ,保证先切换模式后启动双向 DC/DC 控制器。

3.4.2 延时器 2 设定

所设计储能系统,双向 DC/DC 变换器控制电路采用电压型反馈 PI 控制。当变换器低压端接超级电容,高压端接变频器直流母线时, Buck 模式下启动变换器瞬间,会产生极大的冲击电流,从而影响系统正常运行,因此在双向 DC/DC 变换器升压或降压稳定前,需封锁双向 DC/DC 变换器电流,即双向 DC/DC 变换器电流触发信号应适当延时,即增加图 1 中延时器 2。其试验验证波形如图 6 所示。图 6(a)~图 6(f)为延时器 2 在不同

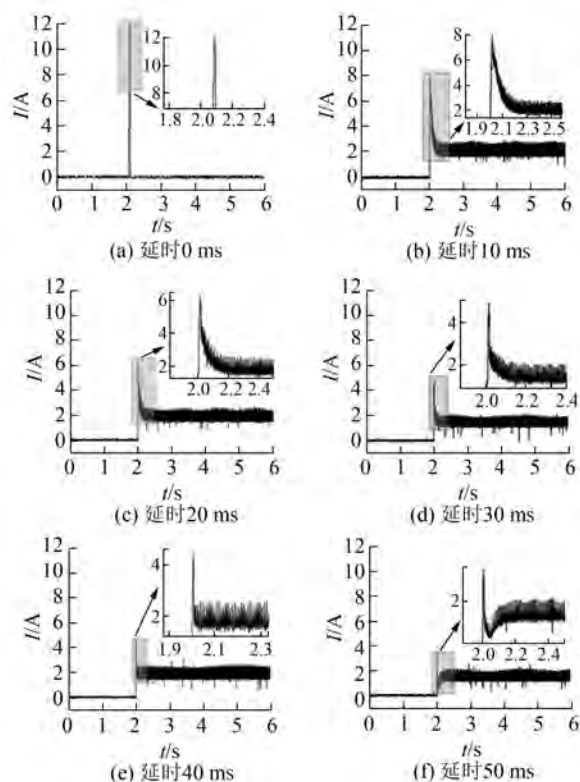


图6 限流信号不同延时下变换器高压侧电流对比图

延时设定值下,双向 DC/DC 变换器工作于 Buck 模式时的高压侧电流检测值。由图 6(a)所示,当无延时器 2 时,双向 DC/DC 变换器 Buck 模式接通瞬间,由于冲击电流太大,导致接通瞬间 IGBT 起动过流保护封锁电路;由图 6(b)~图 6(f)所示,延时器 2 设定适当延时值时,接通瞬间冲击电流可限制到 4 A 以下。通过图 6(b)~图 6(f)对比分析,本文将延时器 2 设定为延时 40 ms。

4 试验验证

本文采用双变频器拖动双电机运行方式搭建了 550 W 的储能系统试验平台。其中,变频器 1 恒频率拖动电机 M1 运行,变频器 2 变频率拖动电机 M2 模拟负载运行,即通过给定变频器 2 阶跃控制信号 m_2 ,调整电机 M2 转速 n_2 ,令电机 M1 分别工作与制动和工作与加载两种工作模式,如图 7 所示。

由图 7 所示,电机转速不能突变,因此,在电机加载与制动之间,存在一段加速和减速区间。此时,既不满足电动设定值,也不满足制动设定值,即系统工作于储能单元待机模式。

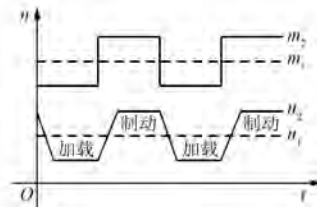


图7 交流电机控制与转速设定图

在上述试验平台与控制方法下,本文通过 3 组试验波形验证了所设计储能系统和状态识别与控制电路的工作特性。各试验验证波形描述如图 8 所示。

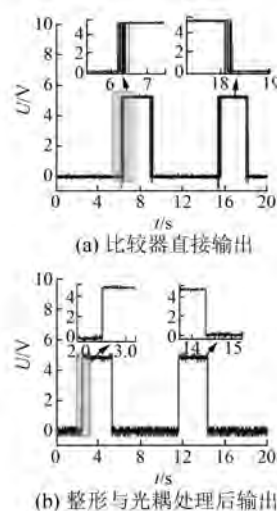


图8 控制器开关信号输出对比

由图 8(a)和图 8(b)中控制信号上升沿和下降沿局部放大图可知,LM393 比较器输出控制信号经过低通滤波、555 整形和光耦隔离处理后,消除了上升沿和下降沿抖动,控制信号得到明显改善。

图 9(a)~图 9(e)为电机 M1 和 M2 在图 7 所示控制方式下,储能系统的主要工作波形。其中,图 9(a)为变频器母线电流波形,在图 9(a)中, i_{ref1} 和 i_{ref2} 为电机运行状态判定参考值。

(1) 当母线电流实际值 $i > i_{ref1}$ 时,如图 9(a)中 $[t_1, t_2]$ 和 $[t_5, t_6]$ 时刻,经状态识别与控制电路,判定为电机 M1 加载。此时,开关控制信号和模式控制信号输出高电平,如图 9(b)和图 9(c)所示,双向 DC/DC 变换器开通,工作于 Boost 模式,高压侧电流为正,如图 9(d)所示,超级电容向负载放电,实现制动能量二次利用。

(2) 当母线电流实际值 $i < i_{ref2}$ 时,如图 9(a)

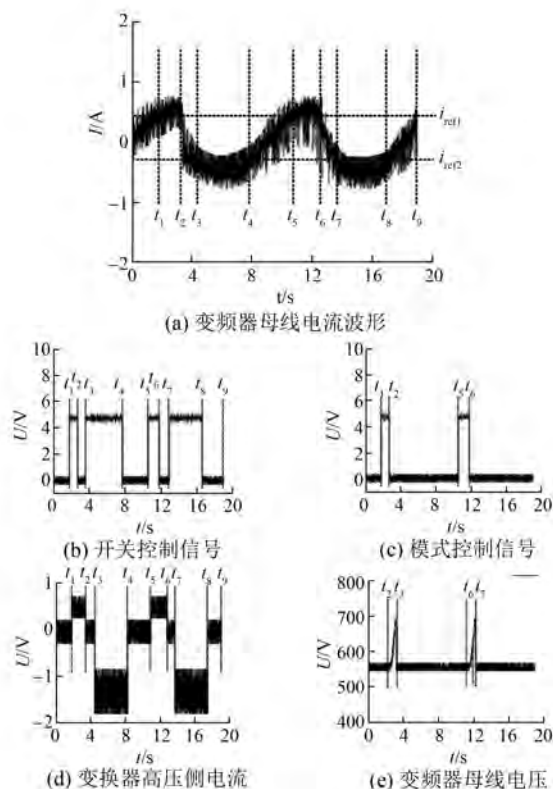


图9 超级电容储能系统主要波形图

中 $[t_3, t_4]$ 和 $[t_7, t_8]$ 时刻,经状态识别与控制电路,判定为电机 M1 制动。此时,开关控制信号输出高电平,而模式控制信号输出低电平,如图 9(b)和图 9(c)所示,双向 DC/DC 变换器开通,工作于 Buck 模式,高压侧电流为负,如图 9(d)所示,系统向超级电容储能。

(3) 当母线电流实际值 $i_{\text{ref}2} < i < i_{\text{ref}1}$ 时,如图 9(a)中 $[0, t_1]$ 、 $[t_2, t_3]$ 、 $[t_4, t_5]$ 、 $[t_6, t_7]$ 和 $[t_8, t_9]$ 时刻。此阶段开关控制信号和模式控制信号均输出低电平,系统工作于储能单元待机模式,双向 DC/DC 变换器高压侧电流为基本为零,如图 9(d)所示。此外,考虑到要留有一定裕量,参考电流 $i_{\text{ref}2} < 0$,而电机 M1 在 t_2 和 t_6 时刻已经开始制动,因此变频器母线电压在 $[t_2, t_3]$ 和 $[t_6, t_7]$ 时刻会明显增大,如图 9(e)所示。

5 结 语

本文设计一种用于交流电机驱动系统制动能量回收和再利用储能系统方案,主要包括几个方面:

(1) 针对传统能耗制动造成能量浪费的问题,论文采用超级电容作为储能单元吸收制动能量。

(2) 详尽分析了储能系统制动能量回收、制动能量再利用和储能单元待机 3 种模式的工作特性。

(3) 采用变频器母线电流作为判定电机运行状态的特征信号,设计了双向 DC/DC 变换器模式切换与控制器通断控制电路。

(4) 通过搭建 550 W 储能系统试验平台,验证了所设计储能系统状态识别与控制电路的可行性。

【参考文献】

- [1] 张国兴,高秀林,汪应洛,等.中国节能减排政策的测量、协同与演变——基于 1978—2013 年政策数据的研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(12): 62-73.
- [2] 陈和权.变频器能耗制动电阻的选型与安装[J].煤炭工程,2010,1(7): 94-95.
- [3] 邓建国,罗隆福,罗德荣.单相电容电动机能耗制动仿真研究[J].电机与控制应用,2007,34(6): 13-16.
- [4] 张寅孩,葛金法,汪松松.基于 Bang-Bang 最优理论的感应电机能耗制动相轨迹分析[J].电工技术学报,2011,26(2): 74-80.
- [5] LELAS M, PAVLOVIC T, ZELJKO B. A supercapacitor based energy storage system for urban transportation energy efficiency improvement[C] // International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, IEEE, 2015: 430-436.
- [6] VOROBYOV M. Research of power electronics converters for supercapacitor storage devices used in industrial systems[C] // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, IEEE, 2015: 596-599.
- [7] 曹秉刚,曹建波,李军伟,等.超级电容在电动车中的应用研究[J].西安交通大学学报,2008,42(11): 1317-1322.
- [8] ZHANG X, WANG X, GUAN Q, et al. Fuzzy-Based Direct Power Control on Elevator System with Energy Feedback[M]. New York: Springer, 2014.
- [9] LANGKOWSKI H, THANH T D, DETTMANN K D, et al. Grid impedance determination — relevancy for grid integration of renewable energy systems[C] // Industrial Electronics, 2009 IECON '09 Conference of IEEE, 2010: 516-521.

(下转第 41 页)

【参考文献】

- [1] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2016 年中国风电装机容量统计[J]. 风能, 2016(2): 32-44.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会.《可再生能源发展“十三五”规划》印发[J]. 风能, 2016(12): 16.
- [3] 蒋雪冬, 赵航. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机 Crowbar 控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 84-89.
- [4] 操瑞发, 朱武, 涂祥存, 等. 双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 72-77.
- [5] 贺益康, 胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.
- [6] 张建忠, 熊良根, 杭俊, 等. DFIG 风电机组串联耦合补偿低电压穿越研究[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 67-72.
- [7] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 25-36.
- [8] 刘巨, 姚伟, 候云鹤, 等. 一种储能改善低电压穿越期间风电场注入电流特性的致稳策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 93-103.
- [9] 刘璐, 耿华, 马少康, 等. 低电压穿越过程中 DFIG 型风电场同步稳定及无功电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 1-9.
- [10] 赵宏博, 姚良忠, 王伟胜, 等. 大规模风电高电压脱网分析及协调预防控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 43-48.
- [11] 谢震, 张兴, 宋海华, 等. 电网电压骤升故障下双馈风力发电机变阻尼控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 39-46.
- [12] 谢震, 张兴, 杨淑英, 等. 基于虚拟阻抗的双馈风力发电机高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 16-23.
- [13] MOHSENI M, ISLAM S M. Transient control of DFIG based wind power plants in compliance with the Australian grid code [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(6): 2813-2824.
- [14] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters [J]. Electrical Power System Research, 2011, 81(7): 1456-1465.
- [15] LIU C J, HUANG X B, CHEN M, et al. Flexible control of DC-link voltage for doubly fed induction generator during grid voltage swell [C] // Proceedings of 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'10). Atlanta, GA, USA: 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'10), 2010: 3091-3095.
- [16] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支撑双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 112-120.
- [17] 郑重, 耿华, 杨耕. 新能源发电系统并网逆变器的高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1463-1472.
- [18] 王勇, 张纯江, 柴秀慧, 等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 14-19.
- [19] 李少林, 王伟胜, 王瑞明, 等. 双馈风电机组高电压穿越控制策略与试验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 76-82.

收稿日期: 2017-11-20

(上接第 24 页)

- [10] 张秋瑞. 城市轨道交通再生制动能量利用技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [11] BARKER P P. Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications [C] // Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2002: 316-320.
- [12] 谭欣, 刘沛津. 基于电信号融合的电机运行状态在线识别技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(11): 71-73.
- [13] TAKEUCHI K. Drive regenerative control system; US 7436137B2 [P]. 2008.
- [14] 苏成贵, 范志华, 钟文才, 等. 三相交流电动机智能测控系统的研究[J]. 价值工程, 2012, 31(18): 36-37.
- [15] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 39-46.

收稿日期: 2017-11-20