

用于故障穿越的飞轮储能双三相异步电机 驱动控制研究

罗小丽¹, 陈意军², 刘万太¹, 李谟发¹

(1. 湖南电气职业技术学院, 湖南 湘潭 411101;

2. 湖南工程学院, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 随着海上风电场的发展和高压直流输电技术的应用, 风电场系统存在交流侧故障穿越的问题。针对这个问题, 提出了一种用于故障穿越的基于模块化多电平变频器和双三相异步电机的飞轮储能系统, 并设计了其驱动控制方案。飞轮储能系统采用了模块化多电平技术能方便地构建大功率高压变频器, 并具备扩容能力。为了提高飞轮储能系统的可靠性, 采用了双三相异步电机驱动, 从而提高了冗余性。接着设计了能均衡各个模块电容电压的双三相异步电机驱动控制算法。最后, 基于 MATLAB/Simulink 仿真平台建立了风电场和飞轮储能系统的仿真模型, 进行了仿真计算。仿真结果验证了飞轮储能系统的功能和驱动控制策略的性能。

关键词: 海上风电; 飞轮储能; 双三相异步电机; 模块化多电平变换器; 故障穿越

中图分类号: TM 46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)08-0088-07

Research on Dual Three Phase Asynchronous Motor Based Flywheel Storage System Control for Fault Ride Through

LUO Xiaoli¹, Chen Yijun², LIU Wantai¹, LI Mofa¹

(1. Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan 411101, China;

2. Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China)

Abstract: Along with the development of offshore wind farm and the application of high voltage direct current transmission technology, the problem of the fault ride through had been serious when the AC side of the wind farm faults. Aiming at it, a new flywheel energy storage system for fault ride through was presented, which was based on modular multilevel converter and dual three phase asynchronous motor, and design the controller of the system. The flywheel energy storage system used the modular multilevel converter technology to construct the high power and high voltage converter, and the capacity expansion has been obtained. In order to improve the reliability of the flywheel energy storage system, a dual three-phase asynchronous motor drive was adopted, and the redundancy had been gained. Then a dual three-phase asynchronous motor drive control algorithm which could balance the capacitor voltage of each module was designed. At last, based on the MATLAB/Simulink platform, the model of the wind farm and the flywheel energy storage system had been simulated and studied. And the simulation verified the functions of the flywheel energy storage system and the performances of the driven control strategy.

Key words: offshore wind power; flywheel storage system; dual three phase asynchronous motor; modular multilevel converter; fault ride through

* 基金项目: 湖南省省级科学研究课题(14C0265): 抑制变频电机高次谐波的优化设计与研究

作者简介: 罗小丽(1973—), 女, 硕士研究生, 副教授, 研究方向为电机与电器及低压供配电。

陈意军(1958—), 女, 硕士研究生, 教授, 研究方向为电机与电器。

刘万太(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器。

李谟发(1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为电机与电器。

0 引言

风力发电装机容量增长迅速,陆基风电已经逐渐发展到海上风电,以获取近海较为丰富的风能资源,并减小陆基风电对环境造成的影响,因此海上风电成为了研究热点^[1-3]。解决海上风电远距离电能传输问题的较好方案是采用高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)^[4]。HVDC 和传统的高压交流输电相比,具有低损耗、不需无功补偿、电缆成本低等优点^[5-6]。

海上风场产生的电能通过 HVDC 传送到陆基的逆变器,然后接入到电网。这种电能传输结构需要分析 AC 侧故障以后的动态行为。当 AC 侧故障发生后,将打破 AC 侧和 DC 侧的有功功率平衡,DC 链路上的直流电压将迅速升高,从而增加功率器件的电压应力,可能造成灾难性的问题。因此,有文献提出一些故障穿越的方法,主要的思路有两个:一是通过控制策略降低海上风电场的能量生成;二是在故障发生时通过额外的 DC 制动单元释放掉额外的能量^[7-9]。但是以上方法都是以牺牲能量传输作为代价的,考虑到海上风场装机容量较大,其能量损失的成本较高。因此有文献提出采用储能系统来实现 HVDC 系统的故障穿越^[10]。飞轮储能系统(Flywheel Energy Storage System, FESS)的原理是利用惯性较大的飞轮存储动能,然后在需要时将动能转换为电能释放出来^[11-12]。FESS 具有结构简单、效率高、能量密度高、生命周期长、易于维护、动态响应快等优点^[13],主要由飞轮转子、电机、能量转换系统和轴承等构成^[14]。

本文在上述文献研究的基础上,设计了一种用于 HVDC 故障穿越的 FESS 系统。考虑到模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converters, MMC)具有易于扩容、低谐波输出和冗余性等优势^[15-16],故采用 MMC 构建了中压大功率的能量转换系统。FESS 系统中电机采用一种双三相异步电机,其与传统三相异步电机相比,具有故障容错能力强、电力集成度高的优点,同时转矩脉动低,有利于储能实现^[17-18]。接着对两个三电平 MMC 和双三相异步电机构成的 FESS 设计了驱动控制器,最后基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了系统仿真模型,对系统运行进行了仿真计算

验证。

1 FESS 系统设计和构成

采用 HVDC 和 FESS 系统的海上风电场示意图如图 1 所示。海上风电机组通过变流器将交流电转换为直流电输出到 HVDC 直流链路,然后直流电通过电缆传输到陆基逆变器,逆变器再将直流电逆变成可控的交流电注入到电网中,在直流链路上接入 FESS 系统,用于故障穿越的实现。图 1 中 P_{dc} 为风电场输出直流功率, $P_{storage}$ 为 FESS 系统输入功率, P_g 为输送给电网的功率。

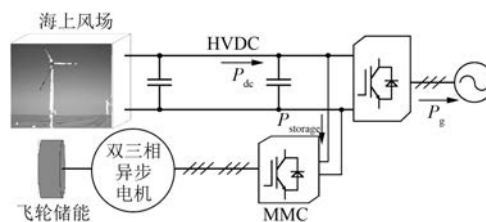


图 1 采用 HVDC 的海上风电场示意图

FESS 系统的构成示意图如图 2 所示,其包括了两个三电平 MMC 构成的变频器和双三相异步电机,以及飞轮储能机械部分。MMC 由子模块(Submodule, SM)构成,其中 MMC 一相中上桥臂和下桥臂电流为 $i_{ph,u}$ 和 $i_{ph,l}$, MMC1 的桥臂电感为 L_a 、 L_b 和 L_c ,输出电流为 i_a 、 i_b 和 i_c ; MMC2 的桥臂电感为 L_u 、 L_v 和 L_w ,输出电流为 i_u 、 i_v 和 i_w , MMC1 和 MMC2 的直流电容电压 U_{dc1} 和 U_{dc2} 为总直流电压 U_{dc} 的一半。

1.1 基于 MMC 的变频器设计

MMC 理论上可由任意数量完全相同的子模块 SM 构成。本文采用的 SM 包括一个由两个功率器件 S'1 和 S1 组成的半桥,以及直流支撑电容 C,具体如图 3 所示^[19]。

SM 在开关状态为“1”的时候,即 S'1 导通和 S1 关断时输出电容电压;在开关状态为“0”时,即 S'1 关断和 S1 导通时输出零电平。MMC 的每相桥臂可分为上桥臂和下桥臂,桥臂如果由 N 个 SM 构成,则可以输出 $N+1$ 电平的电压。子模块 SM 的个数越多,则电平数越多,输出谐波含量越少,但也同时需要实施电容电压均衡控制算法。

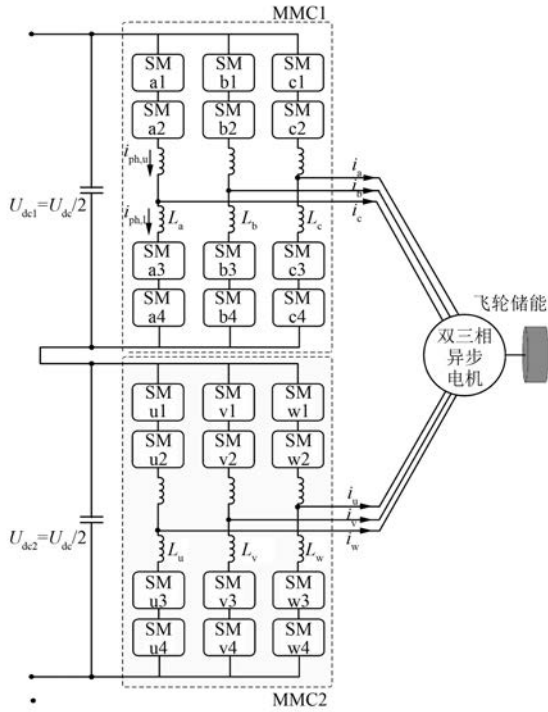


图2 FESS系统的构成示意图

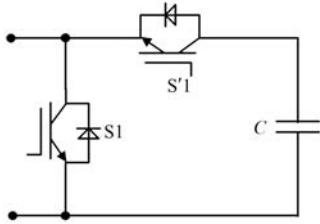


图3 SM结构示意图

在 MMC 中,由于 SM 总电容电压和 DC 链路直流电压存在差异,将产生环流,这是应该通过控制来抑制的。文献[20]给出了 MMC 数学模型,其中上桥臂 $i_{ph,u}$ 和下桥臂电流 $i_{ph,l}$ 的表达式为

$$i_{ph,u} = \frac{i_{dc}}{3} + i_{ph,circ} + \frac{i_{ph}}{2} \quad (1)$$

$$i_{ph,l} = \frac{i_{dc}}{3} + i_{ph,circ} - \frac{i_{ph}}{2} \quad (2)$$

式中: i_{dc} ——直流电流;

$i_{ph,circ}$ ——环流;

i_{ph} ——输出相电流。

由式(1)和(2)式可得 $i_{ph,circ}$ 表达式为

$$i_{ph,circ} = \frac{i_{ph,u} + i_{ph,l}}{2} - \frac{i_{dc}}{3} \quad (3)$$

上桥臂电压 $u_{ph,u}$ 和下桥臂电压 $u_{ph,l}$ 表达式为

$$u_{ph,u} = \frac{U_{dc}}{2} - L_{ph,arm} \frac{di_{ph,u}}{dt} - u_{ph} = n_{ph,u} u_{ph,u,sm} \quad (4)$$

$$u_{ph,l} = \frac{U_{dc}}{2} - L_{ph,arm} \frac{di_{ph,l}}{dt} + u_{ph} = n_{ph,l} u_{ph,l,sm} \quad (5)$$

式中: U_{dc} ——直流电压;

$L_{ph,arm}$ ——桥臂电感;

u_{ph} ——桥臂输出电压;

$n_{ph,u}$ 、 $n_{ph,l}$ ——上桥臂和下桥臂的 SM 个数;

$u_{ph,u,sm}$ 、 $u_{ph,l,sm}$ ——上桥臂和下桥臂的 SM 输出电压。

1.2 双三相异步电机数学模型

双三相异步电机的定子包括两套三相的绕组,在空间上相差 30° 的电角度。电机各变量可以分解在 3 个垂直坐标系下,分别是 $\alpha\beta$ 坐标系, xy 坐标系,零序坐标系。其中 $\alpha\beta$ 坐标系下分量代表了机电能量转换, xy 坐标系下分量代表了损耗能量,而零序坐标系下分量可以忽略^[17-18]。通过旋转坐标解耦变换,可以将时域变量转变为静止变量,具体的坐标变换方程为

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 & 0.886 & -0.866 & 0 \\ 0 & 0.886 & -0.886 & 0.5 & 0.5 & -1 \\ 1 & -0.5 & -0.5 & -0.886 & 0.886 & 0 \\ 0 & -0.866 & 0.866 & 0.5 & 0.5 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ x \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ x \\ y \end{bmatrix} \quad (7)$$

变换后可以得到 dq 坐标系下的定子和转子

$$i_{x's} = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{ds1} - i_{ds2}) \tag{26}$$

$$i_{y's} = \frac{1}{\sqrt{2}}(-i_{qs1} + i_{qs2}) \tag{27}$$

从上述式中可以看出,改变两套绕组定子电流 d 轴分量 i_{ds1} 和 i_{ds2} ,以及 q 轴分量 i_{qs1} 和 i_{qs2} 之间的差异来控制 $i_{x's}$ 和 $i_{y's}$ 以调整直流电容电压,将不会影响到最后的 i_{ds} 和 i_{qs} ,从而也不会影响到对电机磁链和转矩的控制。为了控制变频器输出或吸收有功功率,可以控制 i_{qs1} 和 i_{qs2} ,同时也将两者的差值 $i_{y's}$ 注入到系统中以控制和平衡直流电压。

从图 4 可以看出,驱动控制器的输入为测量得到的两套绕组的三相电流 $i_a、i_b、i_c、i_w、i_v$ 和 i_u ,通过解耦变换,得到 $i_{x's}、i_{y's}$ 和 $i_{ds}、i_{qs}$,然后根据转速外环得到的 d 轴和 q 轴电流参考 $i_{ds^*}、i_{qs^*}$,设置为 0 的 x' 轴电流参考 $i_{x's^*}$,以及由电压差 PI 输出形成的 y' 轴电流参考 $i_{y's^*}$,构成电流 PI 控制器的输入,然后计算后输出电压参考进行反变换输出到 PWM 生成器。其中变换作用的定子位置角 θ_s ,由转子位置观测器观测到 θ_r 后进行滑差补偿计算得到。转速指令是由直流电压参考 u_{dc^*} 和直流电压 u_{dc} 的差值通过 PI 计算控制得到的,即电压高时调高转速指令,电压低时降低转速指令。

2.2 MMC 的相位配置 PWM 技术

MMC 的 PWM 生成采用相位配置 PWM 技术,具体如图 5 所示。首先计算参考电压 u_{ph^*} 和 MMC1 直流电压 U_{dc1} 的差值,然后采用 U_{dc1} 进行标幺,再分别与两种相同频率和振幅,但不同初值的三角载波进行比较,结果相加后形成控制命令 n_u ,然后用 2 减去 n_u 得到另一个控制命令 n_1 。

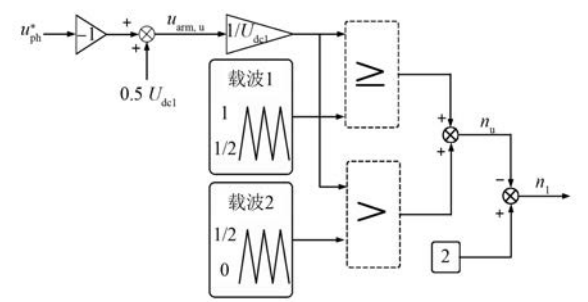


图 5 MMC 的 PWM 原理框图

3 仿真实验

为了检验前述所提出的用于故障穿越的飞轮储能系统方案,以及相关的双三相异步电机驱动控制策略的有效性,根据前述 MMC 和双三相异步电机的数学模型,基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了风电场、HVDC 和 FESS 构成的系统仿真模型,并进行了仿真计算。仿真中系统正常工况下,FESS 系统根据风电场输出功率和电网需求功率之间的差异进行充放电调节。另一方面,当 AC 侧发生故障时,直流母线电压将迅速上升,这时 FESS 系统进入到充电储能模式。主要的仿真系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统相关参数

参数名称	参数值
风电场额定功率 P_w /MW	12
额定直流母线电压 u_{dc} /kV	6
双三相异步电机额定功率 P_m /kW	746
双三相异步电机额定频率 f /Hz	50
MMC 额定直流电压 U_{dc1} /kV	3
MMC 桥臂子模块个数 N	2
子模块额定电容电压 u_{Csm} /kV	1.5
子模块电容容值 C /mF	5
MMC 开关频率 f_{sw} /Hz	500

系统仿真结果如图 6~图 10 所示,其中包括

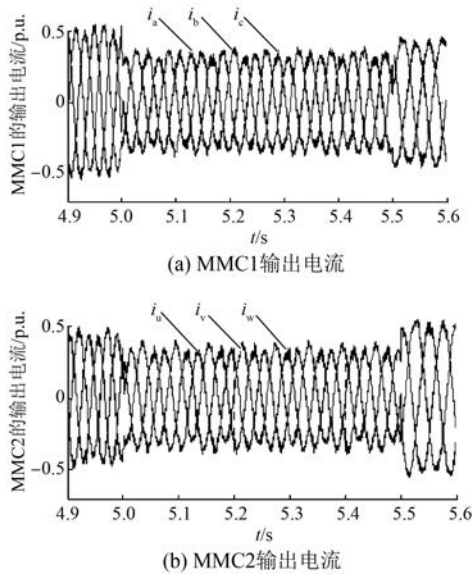


图 6 系统正常工况下的相电流仿真波形

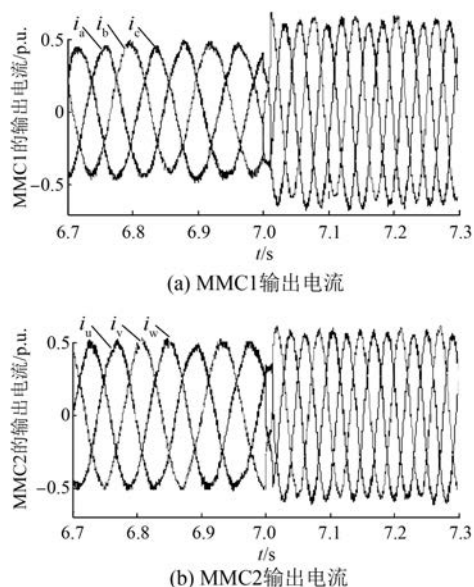


图7 故障穿越时的相电流仿真波形

了正常工况和故障工况,其中故障时间 $t=7$ s。在 $t=3\sim 7$ s时,系统工作在正常工况,FESS根据风电场输出功率和电网功率需求进行充放电调节,例

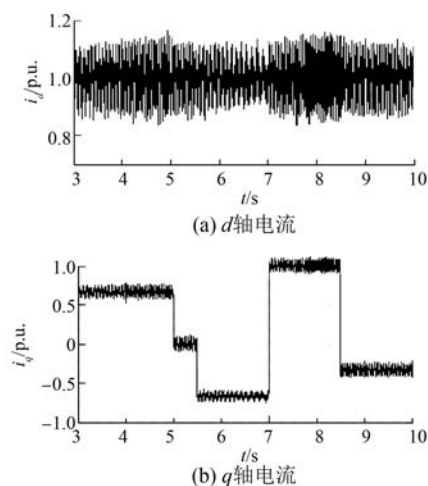


图8 d轴和q轴电流仿真波形

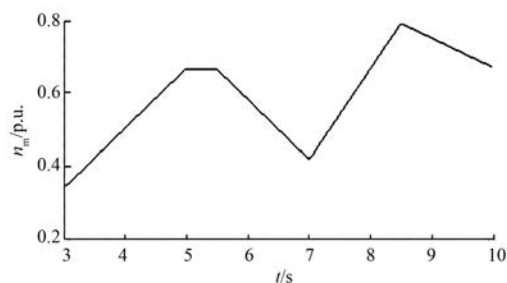


图9 FESS系统电机转速

如在 $t=3\sim 5$ s时,风电场输出功率大于电网需求功率,FESS处于充电模式,而当 $t=5$ s后风电场输出功率等于电网需求功率,FESS进入到惯性空转模式,而当 $t=5.5$ s后风电场输出功率小于电网需求功率,则FESS进入到放电模式,具体的电机相电流波形变化过程如图6所示。在 $t=7$ s时,电网AC侧发生故障,直到 $t=8.5$ s时故障才清除,从图7中可以看到,控制器驱动FESS快速进入到充电模式,电流急剧上升,从而吸收风电场的输出功率,稳定直流电压,而在故障清除后,FESS处于放电模式,因为此时电网功率需求大于风电场输出功率。图8所示为电机的d轴电流和q轴电流波形,其中转矩电流 i_q 跟随着FESS系统工作模式的变化而变化,在充电模式时为正值,提供给飞轮正转矩,进行飞轮储能,而在惯性空转模式时为零,飞轮进行惯性旋转,在放电模式时为负值,给飞轮负转矩,吸收其储能。图9所示为FESS系统的双三相异步电机转速变化曲线。从图9可以看出,FESS充电时转速上升,可以注意到在故障工况时转速上升更快,而在FESS放电时,转速下降从而飞轮是释放能量的。图10所示为MMC1和MMC2的直流电压波形。从图10可以看出,系统正常工况和故障工况下,直流电压均在控制算法的作用下保持稳定,验证了驱动控制的有效性。

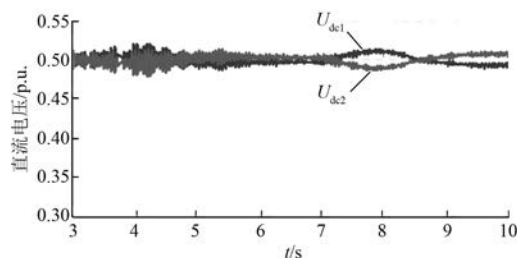


图10 直流电压仿真波形

4 结 语

本文主要围绕一种用于故障穿越的飞轮储能系统及其双三相异步电机驱动控制开展了相关研究。本文的主要结论如下:

(1) 将飞轮储能系统应用在风电场HVDC链路中可以较好地实现故障穿越,提高了电力系统的稳定性,与传统耗能型方法相比,具有能量利用率高的优点。

(2) 应用本文提出的飞轮储能双三相异步电机驱动控制算法,能够有效地控制 FESS 系统在正常工况下根据能量关系充放电,同时在故障工况下迅速响应储能,实现故障穿越,同时能够平衡 MMC 直流电压,并经过了仿真验证。

【参考文献】

- [1] 林鹤云,郭玉敬,孙蓓蓓,等.海上风电的若干关键技术综述[J].东南大学学报,2013,41(4): 882-888.
- [2] 王志新,吴杰,徐烈,等.大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J].中国电机工程学报,2013,33(19): 14-26.
- [3] 吕敬,施刚,蔡旭,等.大型风电场经 VSC-HVDC 交直流并联系统并网的运行控制策略[J].电网技术,2015,39(3): 639-646.
- [4] BLAABJERG F, MA K. Future on power electronics for wind turbine systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 3(1): 139-152.
- [5] BECCUTI G, PAPAFOOTI G, HARNEFORS L. Multivariable optimal control of HVDC transmission links with network parameter estimation for weak grids [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 676-689.
- [6] THANH H T, DONG C L, CHAN K K. A series-connected topology of a diode rectifier and a voltage-source converter for an HVDC transmission system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1579-1584.
- [7] XU L, YAO L. DC voltage control and power dispatch of a multi terminal HVDC system for integrating large offshore wind farms [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(3): 223-233.
- [8] VRIONIS D T, KOUTIVA I X, VOVOS A N, et al. Control of an HVDC link connecting a wind farm to the grid for fault ride-through enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2309-2047.
- [9] RAMTHARAN G, ATULAMPALAM A, EKANAYAKE B J, et al. Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 4(3): 426-438.
- [10] DAOUD I M, MASSOUD A, AHMED S, et al. Ride-through capability enhancement of VSC-HVDC based wind farms using Low speed flywheel energy storage system [C] // IEEE 29th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition Texas, USA: IEEE, 2014: 16-20.
- [11] 欧阳慧珉,张广明,顾剑,等.基于飞轮储能装置的风力发电系统输出功率柔性控制[J].电机与控制应用,2014,41(3): 42-46.
- [12] 陈亚爱,陈焕玉,周京华,等.飞轮储能系统驱动控制策略[J].电机与控制应用,2015,42(4): 16-20.
- [13] 汤延祺,朱焜秋.车载飞轮储能系统及其关键技术研究[J].电机与控制应用,2016,43(5): 38-41.
- [14] 王春喜.飞轮储能系统用高速电机的设计[J].电机与控制应用,2015,42(11): 77-79.
- [15] MOON J W, GWON J S, PARK J W, et al. Model predictive control with a reduced number of considered states in a modular multilevel converter for HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 608-617.
- [16] GUM T S, HEE J L, TAE S N, et al. Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1611-1619.
- [17] ZHAO Y, LIPO A T. Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(5): 1100-1109.
- [18] HANG S C, LEVI E, JONES M, et al. Operation of a six-phase induction machine using series-connected machine-side converters [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2014, 61(1): 164-176.
- [19] ADAM P G, ANAYA L O, ANAYA L, et al. Modular multilevel inverter: pulse width modulation and capacitor balancing technique [J]. IET Power Electronics, 2010, 3(5): 702-715.
- [20] DEBNATH S, JIANG C Q, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [21] DAOUD I M, ABDEL K S A, ELSEROUGI A, et al. Medium voltage flywheel energy storage system employing dual three-phase induction machine with machine-side series-connected converters [C] // IET 7th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Manchester, United Kingdom: IEEE, 2014: 6-8.

收稿日期: 2016-10-21