

DOI: 10.7667/PSPC150894

基于动态励磁电流的双馈风机组控制策略

曹娜¹, 黄坤¹, 于群¹, 李琰², 王真²

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 针对定子励磁电流动态过程对双馈变速风电机组(DFIG)暂态特性的影响, 在传统控制策略基础上, 分析了故障时定子励磁电流的变化过程及其对双馈风电机组暂态特性的影响, 建立了计及定子励磁电流动态过程的DFIG控制模型。在PSCAD/EMTDC仿真平台上, 对传统控制策略和改进后的控制策略进行了仿真比较。结果表明, 在电网故障下, 改进后的控制策略比传统控制策略能更有效地抑制转子侧输出电流的波动, 提高了机组的暂态稳定性和不间断运行能力, 验证了其正确性和有效性。

关键词: 双馈变速风电机组; 定子励磁电流; PSCAD; 控制策略; 电网故障

A control strategy of doubly-fed induction generator based on dynamic process of excitation current

CAO Na¹, HUANG Kun¹, YU Qun¹, LI Yan², WANG Zhen²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: According to the influence of the dynamic process of stator excitation current on the transient characteristics of doubly-fed induction generator (DIFG), this paper, on the basis of traditional control strategy, analyzes the change process of fault stator excitation current and its effect on DIFG's transient characteristics, establishes the DIFG control model including the dynamic process of stator excitation current. This paper compares the traditional control strategy with improved control strategy on the simulation platform of PSCAD/EMTDC. The results show that the improved control strategy can suppress the fluctuation of rotor-side current more effectively under grid voltage fault, and enhance uninterrupted operation capacity and transient stability. By simulation, the correctness and validity of the control strategy are proved.

Key words: doubly-fed induction generator; stator excitation current; PSCAD; control strategy; grid fault

0 引言

在电网故障时, 风力发电机组机端电压会降低, 导致转子过电流、直流侧母线过电压、转矩振荡等一系列暂态过程^[1-4], 对风力发电机组并网运行的稳定性和电力电子变流器的安全运行产生了严重威胁。因此, 研究电网故障状态下风电机组的电磁暂态过程有着重要的意义。

故障时, 风电机组暂态特性与外部电网运行工况、控制系统、硬件结构等诸多因素有关, 本文主要研究控制系统对于风电机组暂态特性的影响。文献[5]考虑到双馈变速风电机组网侧控制与机端电压相位跳变这两个因素, 建立了DFIG故障暂态模型, 研究了双馈变速风电机组故障状态下的暂态运行特性; 文献[6]采用了一种基于电网电压定向的灭

磁控制策略, 有效地减小了双馈变速风电机组在故障状态下运行的暂态过渡时间; 文献[7]在控制策略中考虑到主、漏磁路的饱和因素, 讨论研究了电网发生三相短路故障时双馈变速风电机组的运行特性。

目前, 转子侧控制策略广泛采用基于定子磁链定向矢量控制和基于定子电压定向矢量控制, 文献[8-12]和文献[13-15]分别采用这两种矢量控制并对其进行了仿真研究, 在上述研究中, 针对文章所提出的研究问题忽略了定子励磁电流的动态过程, 在电网正常运行时, 仿真结果表明采用这两种矢量控制都能使双馈风电机组获得良好的运行特性。转子侧PWM变换器的最大输出电流是在电网故障下制约DFIG发电系统不间断运行能力的重要因素之一, 在电网故障时, 发电机转子侧电流波动很大,

影响控制策略的有效性,可能会导致控制失误。计及定子励磁电流能够有效地减小电网故障对转子侧输出电流的影响^[16]。因此在传统控制策略的基础上应计及定子励磁电流的变化过程,建立 DFIG 控制系统模型。

本文在 PSCAD 环境^[17]下搭建了双馈风机的模型,在转子侧控制策略中计及定子励磁电流动态过程,建立了 DFIG 控制系统模型。通过仿真比较验证了在电网电压骤降时,计及定子励磁电流能够有效地抑制转子侧输出电流的波动,提高机组的暂态稳定性。

1 DFIG 的数学模型

两相任意旋转 dq 坐标系下 DFIG 的数学模型^[18]。

1.1 磁链方程

定子磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

转子磁链方程

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_m 为定子与转子绕组之间的互感值; L_s 为定子绕组间的自感值; L_r 为转子绕组间的自感值。

1.2 电压方程

定子电压方程

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_1) \psi_{rq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_1) \psi_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

转子电压方程

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_1 为同步旋转角速度; ω_r 为转子旋转角速度; $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 为转差角速度。

1.3 转矩方程和运动方程

转矩方程

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (5)$$

运动方程

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{D}{n_p} \omega_r + \frac{K}{n_p} \theta_r \quad (6)$$

式中: n_p 电机的极对数; J 为转子及其连接负载的

转动惯量; T_L 为风力机提供的拖动转矩; D 为与转速成正比的阻转矩阻尼系数; K 为扭转弹性转矩系数。

通常假定 $D = 0$, $K = 0$, 则有

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7)$$

式中, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$, 则式可写成

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d^2\theta_r}{dt^2} \quad (8)$$

2 计及定子励磁电流动态过程的转子侧控制策略

双馈变速风力发电机组中的转子侧 PWM 变换器的控制目标是: ① 在变速恒频前提下实现最大风能追踪, 关键是双馈发电机转速或有功功率的控制; ② 双馈发电机输出无功功率的控制, 以保证所并电网的运行稳定性。由于双馈发电机输出有功功率和无功功率与转子 d 、 q 轴电流分量密切相关, 转子侧 PWM 变换器的控制目的就是实现对转子 d 、 q 轴电流分量的有效控制。

本文转子侧 PWM 变换器控制策略采用基于定子磁链定向矢量控制, 由此可得定子磁链的 d 、 q 轴分量分别为 $\psi_{sd} = |\psi_s| = \psi_s$, $\psi_{sq} = 0$ 。

令定子励磁电流矢量

$$\mathbf{I}_{m0} = \frac{\psi_s}{L_m} = \frac{L_s}{L_m} \mathbf{I}_s + \mathbf{I}_r \quad (9)$$

式中, $\mathbf{I}_{m0} = i_{m0d} + j i_{m0q}$ 。

将式(9)代入式(2)中得

$$\psi_r = \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \sigma L_r \mathbf{I}_r = \frac{L_m^2}{L_s} \mathbf{I}_{m0} + \sigma L_r \mathbf{I}_r \quad (10)$$

式中, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 。

将式(9)和式(10)代入 DFIG 电压方程得

$$\begin{cases} U_s = R_s \mathbf{I}_s + L_m \frac{d\mathbf{I}_{m0}}{dt} - j\omega_1 \psi_s \\ U_r = R_r \mathbf{I}_r + \sigma L_r \frac{d\mathbf{I}_r}{dt} + j\omega_s \left(\frac{L_m}{L_s} \psi_s + \sigma L_r \mathbf{I}_r \right) + \frac{L_m^2}{L_s} \frac{d\mathbf{I}_{m0}}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

如此, 式(11)就是一个计及了定子励磁电流动态过程的 DFIG 数学模型。

当电网正常运行时, 定子电压 U_s 和定子磁链

ψ_s 是恒定不变的, 所以定子励磁电流的分量 $\frac{d\mathbf{I}_{m0}}{dt}$ 也是恒定不变的, 即 $\frac{d\mathbf{I}_{m0}}{dt} = 0$ 。当电网故障时, 风

力发电机组机端电压骤降, U_s 和 ψ_s 发生变化, 不再是恒定值, $\frac{dI_{m0}}{dt}$ 也随之发生变化, 即 $\frac{dI_{m0}}{dt} \neq 0$ 。所以在电网电压骤降的情况下, 计及定子励磁电流分量对转子侧输出电流的波动是有影响的。

由式(11)中的定子电压方程可得

$$\frac{dI_{m0}}{dt} = \frac{1}{L_m}(U_s - R_s I_s - j\omega_1 \psi_s) \quad (12)$$

将式(12)代入转子电压方程可得

$$U_r = \sigma L_r \frac{dI_r}{dt} + (R_r + j\omega_s \sigma L_r) I_r + j\omega_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \frac{L_m}{L_s} (U_s - R_s I_s - j\omega_1 \psi_s) \quad (13)$$

式中, $\frac{L_m}{L_s} (U_s - R_s I_s - j\omega_1 \psi_s)$ 就是计及定子励磁电流动态过程的补偿量。

在定子磁链定向条件下, 式(13)可写成如下 dq 轴分量形式

$$\begin{cases} u_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} - \omega_s \sigma L_r i_{rq} + \frac{L_m}{L_s} (u_{sd} - R_s i_{sd}) \\ u_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} + \omega_s \sigma L_r i_{rd} + \omega_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \frac{L_m}{L_s} (u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_1 \psi_s) \end{cases} \quad (14)$$

双馈发电机输出的有功、无功功率与转子侧输出电流 d 、 q 轴分量之间的关系如下:

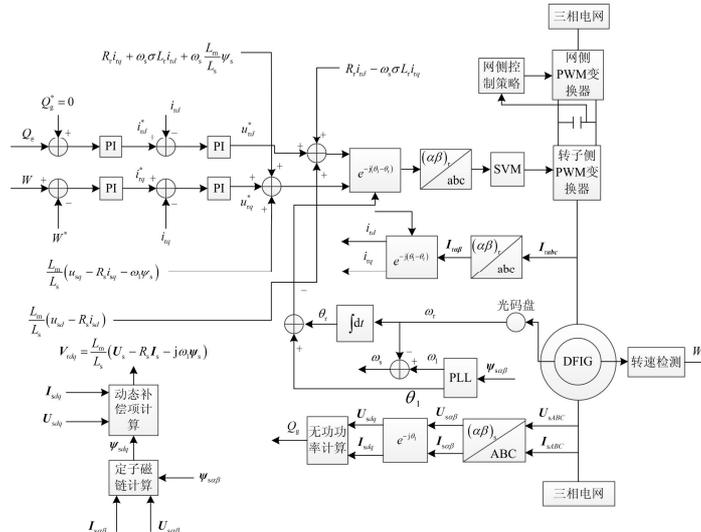


图 1 计及定子励磁电流动态过程的基于定子磁链定向转子侧控制策略原理图

Fig. 1 Block diagram of stator flux-oriented control strategy for the rotor side considering the dynamic process of the stator excitation current

$$\begin{cases} P_g = \frac{3L_m}{2L_s} \omega_1 \psi_s i_{rq} \\ Q_g = \frac{3\omega_1 \psi_s L_m^2}{2L_s} \left(i_{rd} - \frac{\psi_s}{L_m} \right) \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知, 控制策略采用定子磁链定向时, 双馈发电机输出的有功、无功功率分别与转子侧输出电流的 q 、 d 轴分量有关。

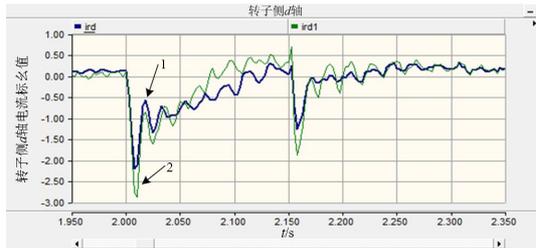
因此可得出改进后的转子侧控制策略。整个控制系统采用双闭环控制, 电机输出的无功功率和电机的转速闭环控制为外环控制, 分别产生转子 d 轴和 q 轴的电流分量参考值; 内环控制为电流控制环。

首先, 将检测到的电机输出无功功率和电机转速作为外环控制的反馈值, 从减少转子励磁电源双 PWM 变换器损耗的角度考虑, 将电机输出无功功率的指令值 Q_g^* 设定为 0; 电机转速的指令值 W^* 由风力机转速特性确定。将检测到的定、转子电压电流, 经过坐标变换, 通过计算得出定子磁链 ψ_s 。将电机转速指令 W^* 、无功功率指令 Q_g^* 与电机转速 W 、无功功率 Q_g 反馈值进行对比, 差值经由 PI 调节器可以分别得出转子电流 d 、 q 轴分量指令值 i_{rd}^* 、 i_{rq}^* , 再和转子电流反馈量 i_{rd} 、 i_{rq} 比较, 其差值经由 PI 调节器后输出电压分量 u_{rd}^* 、 u_{rq}^* , u_{rd}^* 、 u_{rq}^* 加上传统控制策略中的电压反馈项和改进策略中引入的动态补偿项——定子励磁电流的微分项 $\frac{L_m}{L_s} (U_s - R_s I_s - j\omega_1 \psi_s)$, 它在传统控制中常常被视为零而将其忽略。原理如图 1 所示。

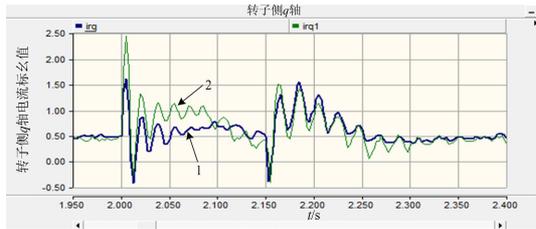
3 仿真验证

为了验证当电网故障时，在转子侧控制策略计及定子励磁电流能够有效地抑制电流波动，在PSCAD平台上搭建了1.5 MW的DFIG变速恒频风力发电系统的仿真模型，其仿真参数如下：额定功率1.5 MW，额定电压0.69 kV，惯性常数为0.85 s，定转子匝比为0.3，定子电阻为0.007 06，转子电阻为0.005，定子漏感为0.171，转子漏感为0.156，励磁电感为2.9(以上参数均为标么值)。

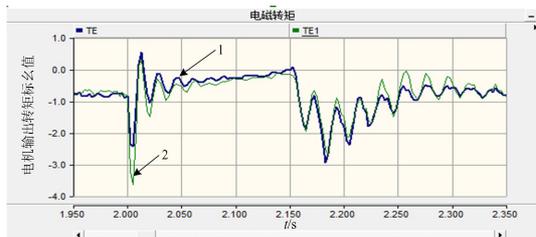
DFIG在风速稳定时($v=13$ m/s)，运行2 s时电网发生三相短路故障，电网电压骤降，持续时间为0.15 s。在电网故障期间，对改进的转子侧控制策略与传统的转子侧控制策略仿真进行比较，比较结果如图2所示。



(a)



(b)



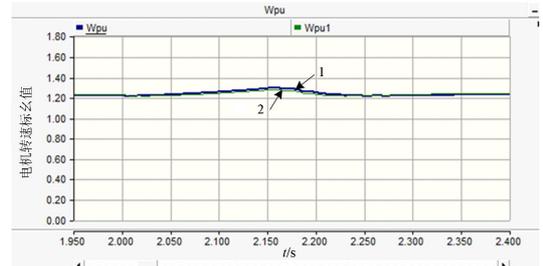
(c)



(d)



(e)



(f)

1: 改进策略; 2: 传统策略

图2 电网故障时改进和传统定子励磁定向矢量控制仿真结果对比

Fig. 2 Comparison of simulation results between the traditional scheme and improved control scheme under gridfault

图2(a)和图2(b)为转子侧输出电流 d 、 q 轴分量波形，电网故障时， d 、 q 轴的电流最大值出现在 $t=2.006$ s，此时，传统控制策略下 $i_{td}=-2.78$ ， $i_{tq}=2.42$ ；改进的控制策略下 $i_{td}=-2.21$ ， $i_{tq}=1.60$ 。通过对比可以看出，改进控制策略下电流波动要比传统控制策略下小很多， d 、 q 轴电流分量分别减小20.5%、33.9%。表明计及定子励磁电流的改进控制策略能够有效地抑制电流波动，防止了电网故障时转子侧变换器过电流的发生。

图2(c)为双馈电机的电磁转矩波形，电网故障时，转矩的最大值出现在 $t=2.004$ s，此时，传统控制策略下 $TE=-3.48$ ；改进的控制策略下 $TE=-2.42$ 。通过对比可以看出，改进的控制策略下电磁转矩的波动幅度比传统控制策略下小，减小了30.5%。有效地减小了电磁转矩在电网故障期间对风电机组转轴系统机械应力的冲击，延长了转轴机械系统的工作寿命。

图2(d)和图2(e)为双馈电机输出的有功和无功功率，故障解除恢复期间，在2.15~2.35 s之间，传统控制策略下，有功功率的波动幅度为2.24，无功功率的波动幅度为1.33；改进的控制策略下，有功功率的波动幅度为1.59，无功功率的波动幅度为1.05。通过对比可以看出，改进的控制策略下，两

者的波动幅度减小了,有功和无功分别减小了 29% 和 21%。

图 2(f)为发电机的转速,在 $t=2.16$ s 时,转速值最大,此时传统控制策略下转速值为 1.27,改进的控制策略下转速值为 1.28。通过对比可以看出,改进的控制策略对转速的控制并没有太大帮助。

4 结论

传统的控制策略都是在假定电网电压恒定、忽略 DFIG 定子励磁电流动态过程的条件下得到的,电网故障时会导致转子侧过电流、转矩震荡等危害。定子励磁电流在电网故障时是变化的,本文在传统控制策略的基础上,计及定子励磁电流的动态过程,建立了 DFIG 控制策略模型。

仿真结果表明,电网故障时,与传统控制策略相比,改进后的控制策略使转子侧电流波动减小了 20%~30%,电机电磁转矩波动减小了 30.5%。改进后的控制策略能够有效地抑制电网故障时转子侧电流以及电机电磁转矩的波动。提高了机组的不间断运行能力。

在以后的研究中,重点研究基于改进控制策略的风电机组动态特性对电网稳定性及继电保护的影响。

参考文献

- [1] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 114-121.
XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 114-121.
- [2] 时锐, 焦然, 陈艳霞. 含大规模风电电网的静态电压仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(12):105-110.
SHI Rui, JIAO Ran, CHEN Yanxia. Static voltage simulation analysis of grid with large-scale wind power[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12):105-110.
- [3] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [4] 郑涛, 李娟, 杨国生. 计及不同电网电压跌落程度的双馈风电机组定子电流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 81-87.
ZHENG Tao, LI Juan, YANG Guosheng. Stator current analysis of doubly-fed induction generators considering different grid voltage dip levels[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 81-87.
- [5] 马静, 蓝新斌, 丁秀香, 等. 考虑网侧控制与机端相位跳变的双馈风电机组对称故障暂态特性研究[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1891-1897.
MA Jing, LAN Xinbin, DING Xiuxiang, et al. Transient characteristics of symmetrical short circuit fault in double fed induction generators considering grid-side converter control and phase-angle jump of DFIG's terminal voltage[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1891-1897.
- [6] 张学广, 徐殿国, 潘伟明, 等. 基于电网电压定向的双馈风力发电机灭磁控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 95-99.
ZHANG Xueguang, XU Dianguo, PAN Weiming, et al. A flux damping control strategy of doubly-fed induction generator based on the grid voltage vector oriented[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 95-99.
- [7] 张文娟, 高勇. 考虑主、漏磁路饱和的双馈风电低电压穿越动态性能分析[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1995-1999.
ZHANG Wenjuan, GAO Yong. Analysis on dynamic performance of low voltage ride-through of doubly fed induction generator considering main flux saturation and leakage flux saturation[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1995-1999.
- [8] 齐桓若, 刘其辉. 双馈风机低电压穿越的改进技术[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 102-108.
QI Huanruo, LIU Qihui. Improved technology for DFIG's low voltage ride through[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 102-108.
- [9] 李东东, 王凯凯, 叶辰升. 采用双馈机组的风电场无功功率控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 37-42.
LI Dongdong, WANG Kaikai, YE Chensheng. Reactive power control research of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 37-42.
- [10] 杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 等. 双馈风机控制器参数整定的实用方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 63-69.
YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, et al. A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 63-69.

- [11] 尹俊, 毕天姝, 薛安成, 等. 计及低电压穿越控制的双馈风力发电机组短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 116-125.
YIN Jun, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Study on short circuit current and fault analysis method of double fed induction generator with low voltage ride-through control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 116-125.
- [12] 吉兴全, 刘贵彬, 李丹, 等. 一种双馈式风机并网的电能质量在线监测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 145-150.
JI Xingquan, LIU Guibin, LI Dan, et al. A methodology for on-line power quality monitoring of grid-connected doubly fed wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 145-150.
- [13] 李辉, 杨顺昌, 廖勇. 并网双馈发电机电网电压定向励磁控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 159-162.
LI Hui, YANG Shunchang, LIAO Yong. Studies on excitation control of power system voltage oriented for doubly-fed generators connected to an infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 159-162.
- [14] 吴国祥, 马祎炜, 陈国呈, 等. 双馈变速恒频风力发电空载并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2007, 22(7): 169-175.
WU Guoxiang, MA Yiwei, CHEN Guocheng, et al. Research on idle load grid connection control strategy for variable speed constant frequency wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 169-175.
- [15] 周羽生, 郑剑武, 向军, 等. 双馈风力发电系统网侧变流器联合控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(4): 25-29.
ZHOU Yusheng, ZHENG Jianwu, XIANG Jun, et al. Combination control strategy for grid convert in doubly-fed wind power generation systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(4): 25-29.
- [16] 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.
WANG Yong, ZHANG Chunjiang, CHAI Xiuhui, et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 14-19.
- [17] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.
FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.
- [18] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2015-12-22

作者简介:

曹娜(1971-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电技术; E-mail: caona_2006@163.com

黄坤(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: huangkun_2009@126.com

于群(1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 姜新丽)