

双馈异步风力发电机虚拟惯性控制技术对比分析

在分析最大风能追踪控制基础上,对双馈异步风力发电机的虚拟惯性控制策略进行了研究,通过仿真研究,从响应速度、控制稳定性及系统频率抑制作用进行了对比。频率变化PI控制曲线稳定性差,波动性大,比附加虚拟惯性以及综合虚拟惯性控制响应慢;曲线优化控制比附加虚拟惯性控制稳定性更强,频率恢复效果更好;综合虚拟惯性控制在之前的控制基础上稳定性更好、响应速度快。

郑景文 秦 亮 刘开培/武汉大学电气工程学院



郑景文/硕士研究生

变速恒频双馈异步风力发电机(Double-Feed Induction Generator, DFIG)组能够通过双PWM变频器控制系统实现发电机的有功、无功解耦控制^[1]。但此过程中系统频率与DFIG的转子转速失去耦合关系,DFIG组对系统频率变化的响应降低,转子转动对电网惯量基本没有贡献^[2]。如果大量DFIG并入电网,整个系统惯量会受到影响,降低整个系统的稳定性^[3]。因此,研究DFIG虚拟惯性控制策略,利用其“隐藏”的动能以及快速的有功调节对提高系统暂态稳定性具有重要的意义。

虚拟惯性控制策略主要包括以下几种:基于频率偏差的PI控制、基于最大风能追踪的附加虚拟惯性控制、基于最大风能追踪曲线优化的虚拟惯性控制和虚拟惯性综合控制^[3-9]。文献[3]分析了基于频率变化的PI控制,并提出了增加电力系统的储能设备来支持频率的控制;文献[4-7]提出将频率控制、转速延时恢复、常规机组配合和转速保护系统四个

模块结合的控制策略;文献[8]研究了控制桨距角来参与频率的控制;文献[9]提出基于最大风能追踪曲线优化的虚拟惯性控制;文献[10,11]提出了虚拟惯性综合控制。关于现有的几种虚拟惯性控制方法,哪种控制策略效果更好、更有优势,目前还没有文章进行详细的比较验证。本文拟从DFIG的数学模型和最大风能追踪控制出发,分析比较各虚拟惯性控制策略的优缺点。对系统突然增加和减少负荷时,不同控制方式对频率变化的抑制作用以及对系统惯性的贡献大小进行比较分析。

DFIG组数学模型及最大风能追踪策略

按照发电机的正方向规定,可以得到 $d-q$ 同步旋转坐标系下DFIG的定转子电压、定子侧输出功率以及磁链数学模型^[10],即

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} + \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} - \omega_1 \psi_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_s = \frac{3}{2}(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \end{cases} \quad (5)$$

关键词/Keywords

双馈风机 ·
虚拟惯性 ·
最大风能 ·
控制策略 ·
对比分析 ·

国家自然科学基金(51207115)。

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 和 u_{rq} 分别为DFIG定、转子电压的 d 轴和 q 轴分量; Ψ_{sd} 、 Ψ_{sq} 、 Ψ_{rd} 和 Ψ_{rq} 分别为DFIG定、转子磁链的 d 轴和 q 轴分量; ω_s 为转差频率, $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$, ω_1 为 $d-q$ 轴同步旋转角速度, ω_r 为转子角速度; L_m 为 $d-q$ 坐标系下同轴定子与转子绕组间的等效互感, $L_m = 3/2L_{ms}$, L_{ms} 为与定子绕组相交链的互感磁通的最大值所对应的定子互感; L_s 为 $d-q$ 坐标系下两相定子绕组的自感, $L_s = L_m + L_{l1}$, L_{l1} 为定子侧漏感; L_r 为 $d-q$ 坐标系下两相转子绕组的自感, $L_r = L_m + L_{l2}$, L_{l2} 为转子侧漏感。

采用定子磁链定向矢量控制, 将 d 轴定为定子磁链矢量方向, 定子电压为 q 轴负方向上, 如图1所示。

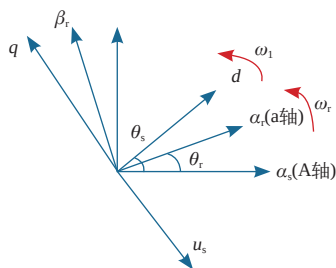


图1 定子磁场定向示意图

基于以上讨论,有 $\Psi_{sd}=\Psi_s$, $\Psi_{sq}=0$, $u_{sq}=-u_s$, $u_{sd}=0$ 。其中, Ψ_s 为定子磁链幅值; u_s 为定子电压幅值。整理式(1)~式(5)可得DFIG定子输出有功功率、无功功率与转子 $d-q$ 轴电流间关系为

$$\left\{ \begin{array}{l} p_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} \omega_s \Psi_s i_{rq} \\ Q_s = \frac{3\omega_s \Psi_s L_m^2}{2L_s} (i_{rd} - \frac{\Psi_s}{L_m}) \end{array} \right. \quad (6)$$

式中, P_s 、 Q_s 分别为DFIG定子侧输出有功功率和无功功率。

由式(6)可以看出,DFIG定子侧输出有功功率和无功功率分别由转子电流 q 轴和 d 轴分量控制,实现了有功无功解耦控制。图2为DFIG最大风能追踪控制框图。功率跟踪曲线为 $P_{\max} = k\omega_r^3$ 。式中, $P_{\max}$ 为某一风速下定子侧输出的最大有功功率; k 为与DFIG有关的常数。

该控制中内环为电流环控制，外环为功率控

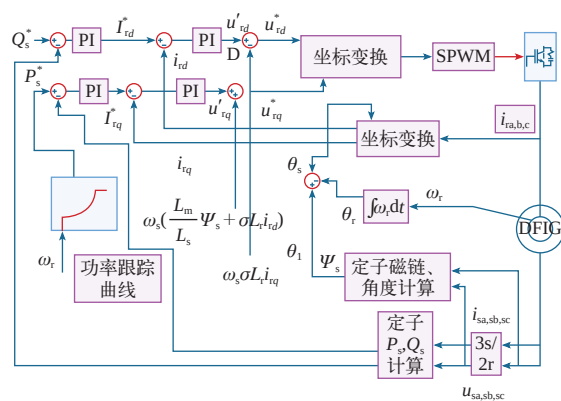


图2 DFIG最大风能追踪控制框图

制。通过最大风能跟踪曲线，输入转子转速，得到相应的定子侧有功参考值。将有功功率、无功功率实际值与参考值比较，差值经PI调节器后，分别输出转子侧电流的 q 轴和 d 轴分量，与实际电流比较，差值经过PI控制，经过解耦与前馈补偿后，输出转子侧电压，控制IGBT的通断，从而实现最大风能的追踪。

DFIG组虚拟惯性控制策略

电力系统的惯量是指对频率突变的阻止能力。DFIG组的虚拟惯性是指通过DFIG的快速有功调节及增加或释放转子的“隐藏”动能,抑制系统频率的突变,虚拟出风机惯量^[9]。

1. 基于频率偏差PI控制

当发电机组有功供给和负荷需求不平衡时会引起发电机组的转速发生变化,即可等效为频率的变化。

因此,以系统的频率 f 为控制量,与参考值的差值经过PI控制,输出电磁转矩或转子电流参考值,让实际值追踪参考值,改变DFIG的有功输出,并改变系统中发电机输出有功与负荷的关系,模拟DFIG的惯性环节,抑制系统频率的变化。基于频率偏差的PI控制框图如图3所示。

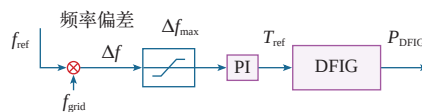


图3 基于频率偏差的PI控制框图

2. 基于最大风能追踪的附加惯性控制

对于DFIG，定义^[12]为

$$P_{em} = J_{DFIG} \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7)$$

$$H = \frac{J_{DFIG} \omega_1^2}{2S} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中，得

$$\frac{P_{em}}{S} = 2H \frac{\omega_r}{\omega_1} \frac{d(\frac{\omega_r}{\omega_1})}{dt} \quad (9)$$

标么化后得

$$P_{\text{标么}} = 2H \omega_{r\text{标么}} \frac{d\omega_{r\text{标么}}}{dt} \quad (10)$$

式中， J_{DFIG} 为风力发电机的固有转动惯量； H 为风机的固有惯性时间常数； S 为DFIG的额定容量。

DFIG基于最大风能追踪的附加虚拟惯性控制框图如图4所示。

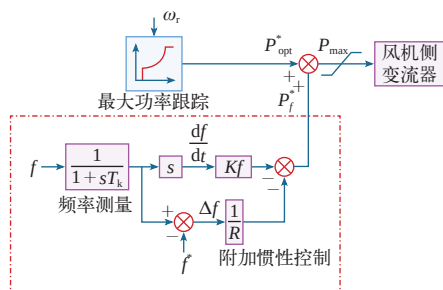


图4 基于最大风能追踪的附加虚拟惯性控制框图

该控制方法以系统的频率 f 的变化量为控制量，由式(10)得，当系统频率变化时， $d\omega/dt \neq 0$ ，风力发电机有功输出改变，经过附加惯性控制，将输出的功率参考值 P_f^* 附加于风机最大风能追踪的功率参考值 P_{opt}^* 上，让实际值追踪参考值。当系统频率降低时， $P_f^* > 0$ ，DFIG组通过降低转子转速，释放部分旋转动能转化为有功功率输入系统；反之，DFIG组有功功率输出减少，从而实现参与系统频率调节的目的。该控制策略包括微分环节和比例控制环节，响应速度较快，微分环节对频率变化率作用，比例环节对动态频率偏差起作用。但是该控制策略在调节的过程中，当DFIG转速降低贡献出动能时，最大功率跟踪控制的有功参

考却因转速降低而减小，附加的虚拟惯性控制与DFIG组的最大风能追踪存在矛盾，会对系统频率调节的稳定性造成一定的影响。

3. 基于最大风能追踪曲线优化的虚拟惯性控制

考虑到基于最大风能追踪的附加虚拟惯性控制与DFIG组的最大风能追踪存在矛盾，故采用基于最大风能追踪曲线优化的虚拟惯性控制。

对于曲线优化的最大风能追踪，定义^[13]为

$$P_{\max} = k \omega_r^3 \quad (11)$$

$$k'_{opt} = \frac{\omega_r^3}{(\omega_r + 2\pi\lambda\Delta f)^3} k \quad (12)$$

$$\lambda = \Delta\omega_r / \Delta\omega_1 \quad (13)$$

式中， k'_{opt} 为优化后的比例系数； λ 为转速调节系数； $\Delta\omega_1$ 为系统同步角速度变化量。根据式(11)~式(13)得到追踪曲线优化虚拟惯性控制框图如图5所示。

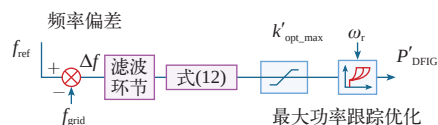


图5 追踪曲线优化的虚拟惯性控制框图

当系统功率不平衡引起频率变化时，频率偏差经过滤波环节由式(13)计算出优化后的最大风能追踪曲线的比例系数，经过幅值限定环节将 k'_{opt} 传递给最大功率追踪曲线优化环节，通过输入转子转速由式(12)得到此刻的DFIG的输出有功功率。其中DFIG的输出有功功率范围为框图中的虚线部分所包含的区域，实线为没有调节时的最大风能追踪曲线，两条虚线分别对应 k'_{opt} 的值为允许最大和最小值时的曲线。此控制方法通过增加DFIG的有功出力达到调控的目的。优化后的最大功率跟踪曲线与频率的变化和偏差相联系，当转子转速变化后，输出的有功功率仍然是追踪最大风能，因此克服了附加虚拟惯性控制中与最大风能追踪的矛盾。使系统的频率调节更为稳定。

4. 虚拟惯性综合控制

考虑到最大风能追踪曲线优化的虚拟惯性控制克服了附加虚拟惯性控制的不足，同时附加虚拟惯性控制主要是改变转子的动能，而曲线优化

虚拟惯性控制主要是改变功率转速曲线, 增加风机有功输出。因此考虑将两种方法结合起来, 实现虚拟惯性综合控制, 控制框图如图6所示。

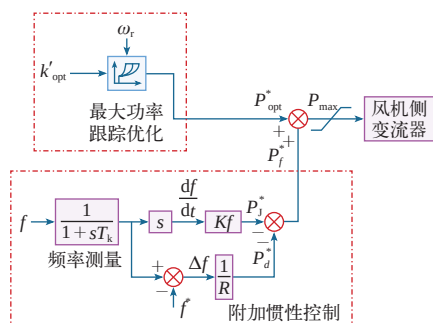


图6 虚拟惯性综合控制框图

虚拟惯性综合控制以系统的频率 f 的变化量为控制量, 经过微分和积分环节将输出功率参考值附加于优化的最大风能追踪输出功率上, 实现双馈式风力发电机转子动能的贡献以及有功快速调节的综合控制。

DFIG组虚拟惯性仿真及分析

1. 仿真系统

本文基于PSCAD/EMTDC仿真环境对以上几种虚拟惯性控制策略进行了仿真验证及对比分析。仿真系统包括: ①两台同步发电机。同步发电机 G_1 、 G_2 的额定功率为60 MV·A, 额定频率 $f=50$ Hz。②一个DFIG。额定功率3 MV·A, 额定频率 $f=50$ Hz, 同步转速为3 000 r/min; 定子、转子电阻 R_s 、 R_r 分别为0.259 Ω 、0.214 Ω ; 定子、转子自感 L_s 、 L_r 分别为4.507 mH、4.503 mH; 定子、转子互感 L_m 为4.22 mH。③负荷 L_1 、 L_2 分别为2 MV·A和3 MV·A。仿真系统如图7所示。

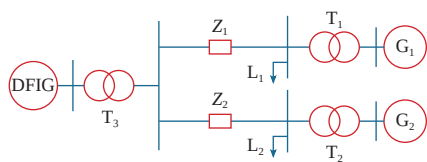


图7 DFIG组虚拟惯性仿真系统

2. 系统负荷突增时仿真分析

风速为10 m/s, DFIG运行于最大风能追踪状态, 4 s时, 向系统中突加负荷 L_2 。DFIG运行于四

种虚拟惯量控制时, 观察系统频率和DFIG的输出功率响应情况如图8和图9所示。

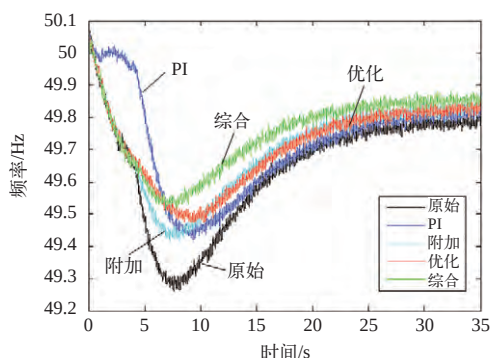


图8 负荷突增时系统频率响应

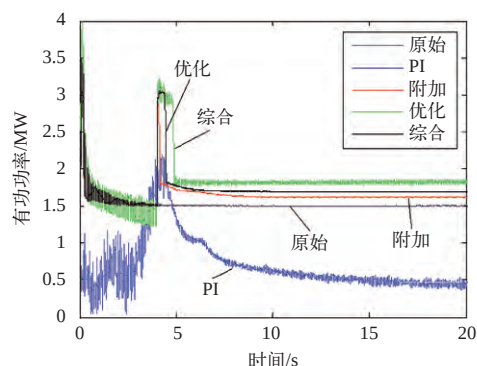


图9 负荷突增时DFIG输出有功功率曲线

图8分别为负荷突增时四种虚拟惯性控制前后, 系统频率响应对应的曲线。从图8中可以看出, 在没有加虚拟惯性控制之前, 当负荷突增时, 系统的频率在7.5 s达到最低值49.27 Hz, 经过一次调频后恢复到49.75 Hz。基于频率偏差PI控制后, 系统的频率在9.5 s达到最低值49.42 Hz, 经过一次调频后恢复到49.75 Hz, 频率变化幅值减少20.5%。经过附加惯性控制后, 系统的频率在7.5 s达到最低值49.43 Hz, 经过一次调频后恢复到49.82 Hz, 频率变化幅值减少20.7%。经过曲线优化控制后, 系统频率在9.4 s时达到最低值49.5 Hz, 经过一次调频后恢复到49.82 Hz, 频率变化幅值减少31.5%。经过综合控制后, 系统频率在7 s达到最低值49.54 Hz, 经过一次调频后恢复到49.82 Hz, 频率变化幅值减少37%。

对比控制前后的频率变化以及四种控制方法的控制效果可以看出: ①采用虚拟惯性控制后,

系统频率变化得到了明显降低,DFIG组在频率动态过程中对系统起到了明显的惯性支持作用。②频率变化PI控制曲线比附加虚拟惯性以及综合虚拟惯性控制响应慢;曲线优化控制比附加虚拟惯性控制稳定性更强,频率恢复效果更好;综合虚拟惯性控制在之前的控制基础上稳定性更好、响应速度快。

图9分别为负荷突增时四种虚拟惯性控制前后,DFIG输出的有功功率对应的曲线。对比各条曲线,可以看出。

1) 在没有加虚拟惯性控制之前,当负荷突增时,DFIG对系统的频率变化基本是没有响应,为一定值。

2) 频率变化PI控制时,DFIG输出的有功功率不稳定。附加虚拟惯性、曲线优化及综合虚拟惯性控制时DFIG输出的有功保持稳定输出。

3) 曲线中由于DFIG的最大输出为 $3\text{ MW}\cdot\text{A}$,故曲线有一段出现功率限制阶段。但图9中可以看出,功率限制的时间为综合虚拟惯性控制>曲线优化控制>附加惯性控制。即DFIG的有功功率大小为综合虚拟惯性控制>曲线优化控制>附加惯性控制。

图8、图9表明,当系统负荷突增时,通过虚拟惯性控制,DFIG的有功会快速地响应抑制频率的变化。DFIG的有功功率大小为综合虚拟惯性控制>曲线优化控制>附加惯性控制>频率变化PI控制;控制前后对频率变化抑制效果为综合虚拟惯性控制>曲线优化控制>附加惯性控制>频率变化PI控制。

3. 系统负荷突减时仿真分析

风速为 10 m/s ,DFIG运行于最大风能追踪状态,4 s时,系统负荷 L_2 从 $3\text{ MV}\cdot\text{A}$ 减为 $0\text{ MV}\cdot\text{A}$ 。DFIG运行于四种虚拟惯量控制时,观察系统频率和DFIG的输出功率响应情况如图10和图11所示。

图10为负荷突减时四种虚拟惯性控制前后,系统频率响应对应的曲线。从图10中可以看出,在没有加虚拟惯性控制之前,当负荷突减时,系统的频率最高值为 50.4 Hz 。基于频率偏差PI控制后,系统的频率最高值为 50.3 Hz ,频率变化幅值

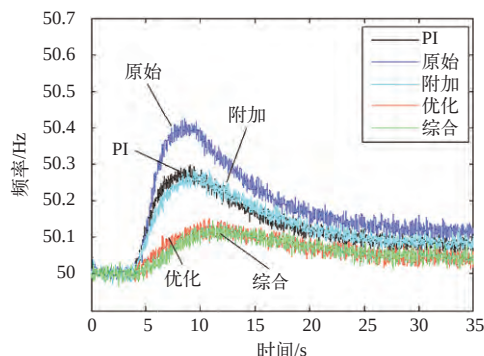


图10 负荷突减时系统频率响应

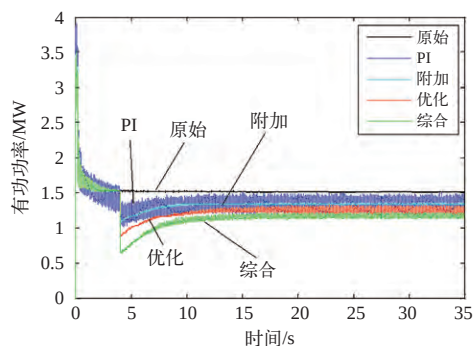


图11 负荷突减时DFIG输出有功功率曲线

减少 16.7% 。经过附加惯性控制后,系统的频率最高值为 50.27 Hz ,频率变化幅值减少 21.6% 。经过曲线优化控制后,系统的频率最高值为 50.15 Hz ,频率变化幅值减少 41.6% 。经过综合控制后,系统的频率最高值为 50.13 Hz ,频率变化幅值减少 45% 。

图11对负荷突减时四种虚拟惯性控制前后,DFIG输出的有功功率对应的曲线进行了对比。从图中看出DFIG有功功率改变量为综合虚拟惯性控制>曲线优化控制>附加虚拟惯性控制>频率变化PI控制。同时频率变化PI控制时,DFIG的输出功率不稳定,波动较大。

结合图10、图11表明,当系统负荷突减时,通过虚拟惯性控制,DFIG有功输出变化越大,虚拟出的惯性越大,对系统频率的支持作用越显著。

结束语

本文基于DFIG数学模型及最大风能追踪控制,研究了DFIG组的虚拟惯性控制技术,对比分

析了基于频率变化的PI控制、附加虚拟惯性控制、最大风能曲线优化虚拟惯性控制和综合虚拟惯性控制原理及策略。并通过仿真综合比较了各控制方式的控制特性。

1) 通过DFIG的快速有功调节及增加或释放转子的“隐藏”动能,可以抑制系统频率的突变,系统频率变化幅值明显降低。

2) 频率变化PI控制曲线稳定性差,波动性大,比附加虚拟惯性以及综合虚拟惯性控制响应慢。曲线优化控制比附加虚拟惯性控制稳定性更强,频率恢复效果更好。综合虚拟惯性控制在之前的控制基础上稳定性更好、响应速度快。

3) 虚拟惯性控制中,当系统频率突变时,DFIG有功功率改变量为综合虚拟惯性控制>曲线优化控制>附加虚拟惯性控制>频率变化PI控制。

参考文献

- [1] 贺益康,郑康,潘再平,等.交流励磁变速恒频风电系统运行研究[J].电力系统自动化,2004,28(13):55-59.
- [2] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统的分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [3] Chang-Chien L R, Hung C M, Yin Y C. Dynamic reserve allocation for system contingency by DFIG wind farms[J]. IEEE Transactions on Power System, 2008, 23(2):729-736.
- [4] 曹军,王虹富,邱家驹.变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(13):78-82.
- [5] 苑国锋,柴建云,李永东.变速恒频风力发电机

组励磁变频器的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(8):90-94.

- [6] 关宏亮,迟永宁,王伟胜,等.双馈变速风电机组频率控制的仿真研究[J].电力系统自动化,2007,31(7):61-65.
- [7] 韩民晓,崔军立,姚蜀军.大量风电引入电网时的频率控制特性[J].电力系统自动化,2008,32(1):29-33.
- [8] Lalor G, Mullane A, O'Malley M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4):1905-1913.
- [9] 李和明,张祥宇,王毅,等.基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J].中国电机工程学报,2012,32(7):32-39.
- [10] Arani M F M, El-Saadany E F. Implementing virtual inertia in DFIG-based wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):1373-1384.
- [11] El Mokadem M, Courtecuisse V, Saudemont C, et al. Fuzzy logic supervisor-based primary frequency control experiments of a variable-speed wind generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1):407-417.
- [12] 邹贤求,吴政球,陈波,等.变速恒频双馈风电机组频率控制策略的改进[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(3):63-68.
- [13] 张祥宇.变速风电机组的虚拟惯性与系统阻尼控制研究[D].北京:华北电力大学,2013.

(收稿日期:2014-07-23) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告