

直驱永磁同步风电系统低电压穿越的研究

杨晓萍, 段先锋, 冯帆

(西安理工大学水利水电学院, 陕西, 西安 710048)

摘要: 建立经背靠背双PWM变流器并网的直驱式永磁同步风力发电系统的仿真模型, 采用电流前馈法实现两侧变流器有功和无功功率的解耦控制; 通过对风力机功率-转速曲线的分析, 提出了按照电压跌落幅度减小发电机输出功率的控制策略, 以提高风力发电系统的低电压穿越能力。仿真结果表明在电网电压跌落时, 这种策略通过减小发电机输出功率限制了变流器直流电压的升高, 通过对桨距角的控制抑制了机组机械转速的升高, 提高了直驱永磁风电系统的低电压穿越的能力, 还可向系统提供无功功率支持, 帮助电网电压恢复。

关键词: 直驱式风力发电; 永磁同步发电机; 电压跌落; 低电压穿越; 无功补偿

0 引言

近年来, 风力发电在世界范围内得到了迅猛的发展, 风能电力在电网供电中所占比重正在逐年上升, 如丹麦已经超过20%。因此, 风力发电系统对电网的影响也越来越受到关注。新的人网规则要求在电网电压跌落时, 风力发电机能象传统的发电机一样不脱网运行, 并且向电网提供一定的无功功率, 直到电网电压恢复, 从而“穿越”这个低电压时期, 这就是低电压穿越(Low Voltage Ride through, LVRT)^[1]。目前, 风力发电技术领先的国家, 如丹麦、德国已经相继定量的给出了风力发电系统的低电压穿越的要求。

当前在风力发电市场中, 直驱式永磁同步风力发电系统(Directly Driven Wind Turbine with Permanent magnet Synchronous Generator, D-PMSG)以其结构简单、维护成本低、可靠性高等优点而代表着风力发电未来的发展方向^[2]。在低电压穿越方面, D-PMSG已经被证明具有很好的能力^[3]。电网电压跌落瞬时, 导致D-PMSG向电网注入功率减小, 而发电机输出功率瞬时不变, 这种功率不平衡将导致直流电压上升, 危及电力电子器件的安全。如果控制直流电压稳定, 则必然引起注入电网电流激增, 同样也会损坏变流器。文献^[3,5]采用了在直流环节加装耗能电阻或储能系统, 把电压跌落时由于逆变器电流限制所致的直流侧多余能量消耗掉或储存起来, 防止直流电压升高, 从而实现低电压穿越。文献^[4]通过在网侧逆变器交流侧加装带通滤波器以滤除电网电压不对称时的负序电压, 使得在逆变器交流侧看来仍然只有正序电压以实现电网电压不对称跌落的穿越。这些方法都要增加专门的元件, 降低了系统的可靠性和经济性, 同时也使得控制变得复杂。

本文在对风力机输出功率-转速关系进行分析的基础上, 在电网电压跌落时, 把电网电压跌落信号引入机侧整流器控制器的功率外环的参考功率的计算, 减小发电机输出功率, 防止网侧逆变器过电流和直流过电压; 另一方面, 通过对桨距角的控制, 减小风力机输出功率以限制机组机械转速

的升高。并基于电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC对这一控制策略进行仿真研究, 验证其正确性和有效性。

1 低电压特性分析

1.1 电网电压跌落的影响

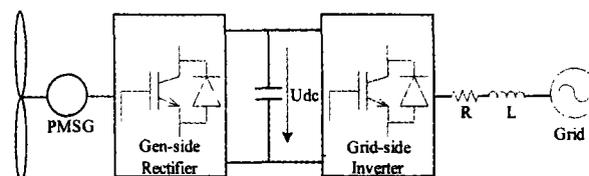


图1 经背靠背PWM变流器并网的直驱永磁风力发电系统

本文采用的直驱式永磁同步风力发电系统如图1所示, 风力机直接驱动永磁同步发电机经背靠背双PWM变流器并入电网。风力发电系统注入电网的功率 P 可由式(1)表示:

$$P = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (1)$$

$u_{a,b,c}, i_{a,b,c}$ 分别为电网三相瞬时电压和电流。转换到两相旋转坐标系则式(1)可以表示为:

$$P = u_d i_d + u_q i_q \quad (2)$$

u_d, i_d, u_q, i_q 分别为电网电压电流的d、q轴分量。

若取q轴与电网电压矢量方向一致, d轴落后其 90° , 则 $u_d = 0$, 于是式(2)可以化简为:

$$P = u_q i_q \quad (3)$$

电压跌落时, 考虑最严重的情况, 假定逆变器工作于单位功率因数且已经达到额定电流, i_q 被限制不能增加。这时, 注入电网的有功功率下降, 并且下降幅度与电压跌落幅度一致, 见式(4)。

$$P_f = u_{qf} i_q = u_q i_q \cdot \frac{u_{qf}}{u_q} = P \cdot \frac{u_{qf}}{u_q} \quad (4)$$

P_f, u_{qf} 为电压跌落后注入电网的功率和q轴电压。在直流侧, 由于发电机输出功率没有减小, 这导致了功率不平衡引起直流电压的升高, 危及变流器电力电子器件的安全。通过控制减少发电机输出功率 P_g 使得 $P_g = P$, 就可保持直流侧功率平衡, 限制直流电压升高, 实现风电系统的低电压穿越。

1.2 风力机功率-转速曲线

根据贝兹理论^[6], 风力机从空气中吸收的功率P为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度; V 为风速; R 为风力机风轮半径; C_p 为风力机风能利用系数, 它是叶尖速比 λ 和桨叶桨距角 β 的函数; ω 为风力机机械角速度。而风速不变时, 功率P是 C_p 的比例函数。

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (6)$$

$$C_p = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda} - 0.58\beta - 0.02\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda}} \quad (7)$$

其中 $\lambda_1 = 1 / \left(\frac{1}{\lambda - 0.02\beta} - \frac{0.03}{\beta^3 + 1} \right)$

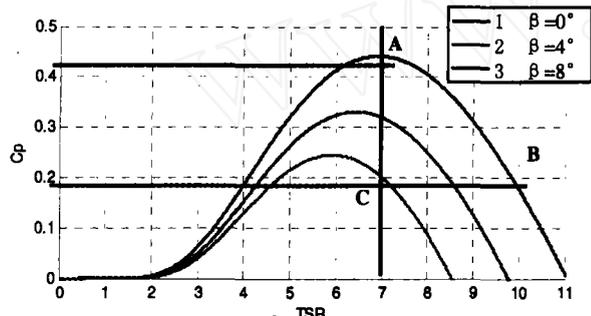


图2 风力机功率特性曲线

图2是在风速不变时, 风力机风能利用系数与转速和桨距角的关系。从图中可以看出, 对每一个已知的桨距角 β 都对应一条风力机 C_p - λ 曲线, 每一条曲线都有一个对应着一个 C_p 最大值的最佳叶尖速比 λ , 而桨距角为零时可以获得最大的风能利用系数 C_{pmax} , 如图中点A。对应的转速为最佳转速 ω_{opt}

在额定风速以下正常运行时, 为了最大的从空气中吸收能量, 风力机桨距角被控制在 $\beta=0$ 并在最佳转速附近运行^[7]。电网电压跌落前, 风力发电机以最佳转速 ω_{opt} 在点A稳定运行, 输出最大功率 P_{max} 。

电压跌落, 假定风速不变, 按电压跌落幅度控制发电机输出的有功功率 $P_g = P_f$, 这时, 由于惯性风力发电机转速还是 ω_{opt} 。如果不进行桨距角调节, 由于这时风力机输出的功率 P_m 仍为 P_{max} , 大于 P_g , 发电机开始加速, 离开最佳运行点A, 其输出功率 P_m 逐渐减小。当减小到 $P_m = P_g$, 发电机停止加速, 稳定运行在点B。当电网电压恢复时, 控制发电机输出功率恢复为 P_{max} , 这时 P_{max} 大于 P_m , 发电机又开始减速, 沿 C_p - λ 曲线从点B回到点A正常运行。这种方法导致转速过分升高。如果进行桨距角调节在保持转速不变的同时减小 P_m , 运行点由 $\beta=0$ 曲线上点A变化到曲线2上的点C运行。电网电压恢复时, 再控制桨距角和发电机功率使运行点由点C回到点A运行。这相当于汽轮发电机调节汽门以减小原动机

输出功率。在这个过程中, 保持了发电机功率平衡和变流器的功率平衡, 防止了发电机转速和变流器直流电压的升高。

2 控制策略

2.1 桨距角控制

变桨距风机比定桨距风机在技术上更具优势, 也是当前风力机普遍采用的技术。如前所述, 桨距角对 C_p 有较大影响。调节桨距角可以从源头上调节风电机组的功率。

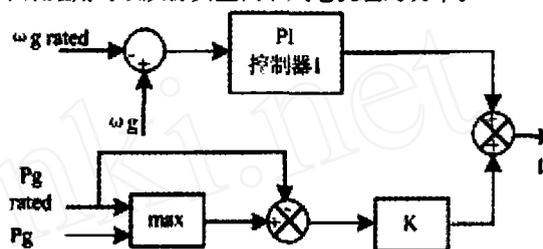


图3 桨距角控制器

图3是本文采用的桨距角控制器^[6], 图中, 对 β 的调节分为两路。一路是把机组机械转速和其额定转速的差值经过PI控制得到; 另一路是机组功率和额定功率的大者减去额定功率得到的差值经比例调节后得到, 这一路只有机组功率大于额定功率时才起作用。它在转速超过机组额定转速或功率超过发电机额定容量时增大桨距角以减小机组风能利用系数 C_p , 从而保持机组转速和功率不超过额定值。

2.2 机侧整流器的控制

机侧整流器的控制, 就是对永磁同步发电机的控制。通过对发电机定子电流的控制, 调节发电机电磁转矩 T_e 进而控制发电机的转速。在 dq 两相同步旋转坐标系中, q 轴定向于发电机感应电动势空间矢量方向, 并假定发电机 d 、 q 轴电感相等, 建立永磁同步发电机的数学模型为^[8]:

$$\begin{aligned} u_d &= R_a i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e L i_q \\ u_q &= R_a i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e L i_d + \omega_e \psi \end{aligned} \quad (8)$$

式中, u_d, u_q 为发电机电压 u_g 的 d 、 q 轴分量; R_a 为定子电阻, L 为定子电感; i_d, i_q 分别为发电机 d 、 q 轴电流; $\omega_e = n_p \omega_g$ 为发电机电角速度, n_p 为极对数, ω_g 发电机机械角速度; ψ 为永磁体磁链。

而发电机的电磁转矩 T_e 为:

$$T_e = n_p i_q \psi \quad (9)$$

它和输入发电机的机械转矩 T_m 一起决定了发电机的转速 ω_g :

$$\frac{d\omega_g}{dt} = (T_e - T_m - \omega_g B_m) / J \quad (10)$$

式中 B_m 为转动粘滞系数; J 为机组转动惯量。

图4是机侧整流器控制框图。控制器内环为电流环, 外环为功率环^[9]。内环控制中, 令 $i_{dre} = 0$ ^[8], i_{qref} 由功率外环得

到, 并对d、q轴分量进行电流前馈解耦实现P、Q的解耦控制; 外环控制中, 参考功率与实际功率比较后经PI环节得到q轴电流参考值 i_{qref} 。而参考功率Pref由最大风能捕获算法得到的风力机最大输出 P_{max} 和电网电压水平决定, 见式(11):

$$P_{ref} = P_{max} \cdot \frac{u_{sq}}{u_{qe}} \quad (11)$$

u_{sq} 电网电压跌落后的实际q轴电压; u_{qe} 电网电压正常时的q轴电压。 u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为电网三相电压瞬时值; i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 为电网三相电流瞬时值。

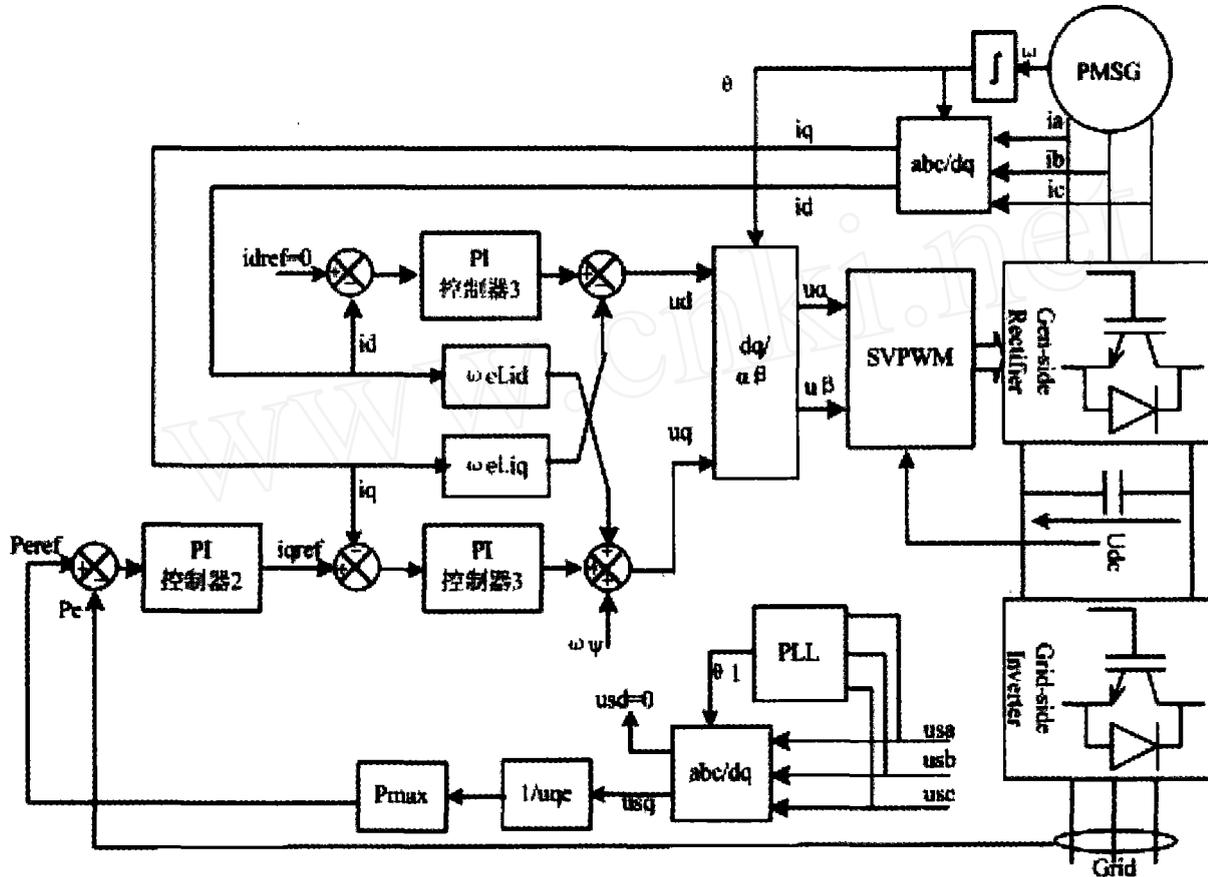


图4 机侧整流器控制策略

2.3 网侧逆变器的控制

网侧逆变器的控制目标是要把机侧整流器整流的直流电变换成符合并网条件的交流电, 并维持直流电压的稳定。在电网电压定向的同步旋转坐标系(q轴定向电网电压空间矢量, d轴落后其 90°)下, 网侧逆变器的数学模型如下^[10]:

$$\begin{aligned} u_{id} &= -Ri_{sd} - L \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_e Li_{sq} \\ u_{iq} &= -Ri_{sq} - L \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_e Li_{sd} + u_{sq} \end{aligned} \quad (12)$$

式中 u_{td} 、 u_{tq} 为逆变器交流侧d、q轴电压; L、R分别为连接电抗器的电感和电阻; ω 为电网电压电角速度; i_{sd} 、 i_{sq} 为d、q轴电流; u_{sq} 为电网电压空间矢量。

图5为网侧逆变器控制框图。内环为电流环, 外环为电压环^[10]。内环控制中, 应用电流前馈解耦实现P、Q解耦控制。q轴电流参考值 i_{sqref} 由电压外环的电压误差信号经PI调节后产生, d轴电流参考值 i_{sdref} 根据式(13)、(14)中的较小者确定。式(13)是根据需要的无功功率计算的 i_{sdref} , 式(14)是根据逆变器极限电流空间矢量所确定的 i_{sdref} 。

$$i_{sdref} = \frac{Q}{u_{sq}} \quad (13)$$

$$i_{sdref} = \sqrt{i^2 - i_{sq}^2} \quad (14)$$

上两式中Q为电网需要的无功功率; i为逆变器极限电流空间矢量。

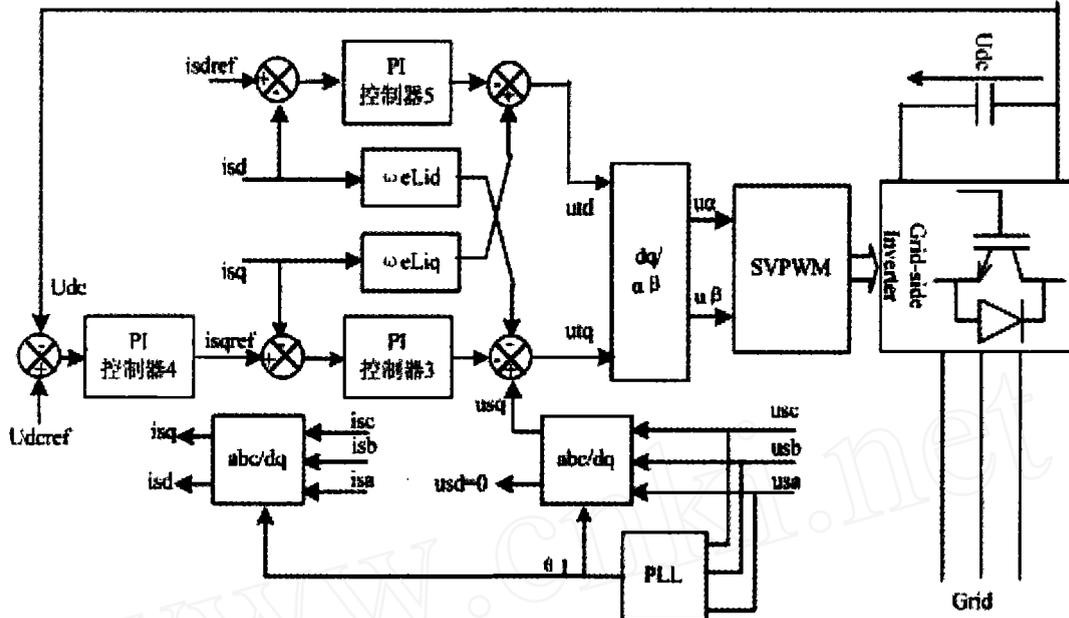


图5 网侧逆变器控制策略

3 仿真与分析

在电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC中建立了直驱式永磁同步风力发电系统的仿真模型,仿真参数如下:永磁同步发电机额定风速13m/s,额定容量2.5MW,额定电压690V,极对数 $n_p=40$,额定频率为15.885Hz,定子电阻 $R_a=0.001\Omega$,电感 $L=0.0015H$;逆变器方面,额定容量2.5MW,直流电容 $C=10000\mu F$,连接电抗器电阻 $R=0.001\Omega$,电感 $L=0.0005H$,并网变压器低压侧线电压为690V。取转动粘滞系数为0,转动惯量 $J=16000kgm^2$ 。

本文对在风速为额定风速、风力发电系统以单位功率因数运行时,发生三相对称电压跌落特性进行仿真。跌落幅度为50%,持续时间为0.5秒,2s开始跌落,2.5s电压恢复。

图6是不进行桨距角调节时的仿真结果。从图中可以看到,当只控制发电机功率而不进行桨距角控制时,虽然可以平衡直流侧功率,限制直流过电压,但机组转速上升了43%,这在实际中是不能接受的,见图6(d)。

控制发电机功率的同时进行桨距角控制的仿真结果如图7所示。在电压跌落期间,通过保持变频器的功率平衡和发电机的平衡抑制了直流电压和转速的升高。电压跌落瞬间,发电机功率不能突变,变流器输入功率大于输出功率,直流电压开始上升。随后机侧整流器控制减小发电机输出功率维持变流器功率平衡,限制直流电压升高;另一方面对发电机而言,又出现输入机械功率大于输出功率的情况,机组转速会升高。这时桨距角控制器增大桨距角减小输入发电机的机械功率,维持其功率平衡,从而限制了机组转速的升高。图7(b)、(f)表明电压跌落期间变流器直流电压和机组转速只受到很小的扰动又恢复了参考值。电网电压恢复后,系统又恢复正常运行。

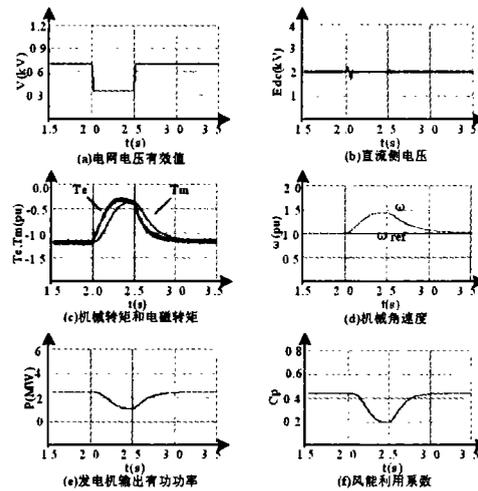


图6 无桨距角控制的仿真结果

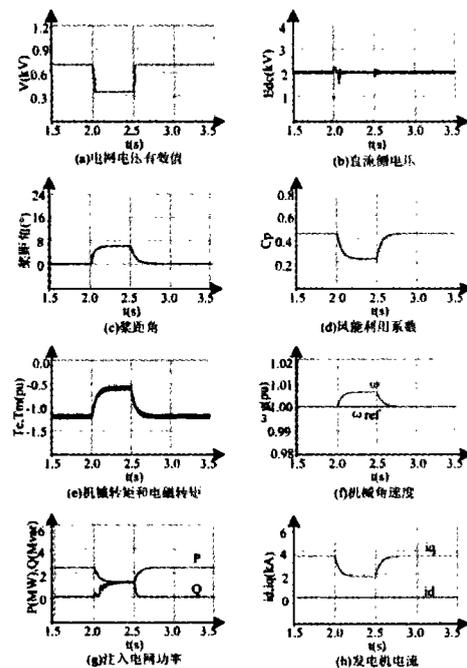


图7 有桨距角控制的仿真结果

4 结语

本文把跌落后的电压与正常电压的比值和风力机最大输出功率的乘积作为机侧整流器控制功率外环的功率参考值,从而限制跌落时的发电机输出功率;同时辅以桨距角控制限制风力机输出功率。仿真结果表明,如果只控制发电机输出功率而不辅以桨距角调节减小风力机输出则转速将有较大升高,而进行桨距角调节以后,就可以保持机械转速维持在额定水平。相对于增加卸荷负载和补偿装置的方法,这种低电压穿越方法的最大优点是电路上不需要增加任何装置,只是通过功率控制和桨距角控制就提高了直驱永磁同步风力发电机的低电压穿越能力,可靠性和经济性都有所增强。

参考文献

- [1] 张强,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化,2008,20(2):1-8
- [2] 张春晖.大型风电设备发展的新方向——定子超高压转子永磁化[J].电器工业,2007(7):48-50
- [3] Abbey C, Li W, Owatta L. Power electronic converter control techniques for improved low voltage ride through performance in WTGs[C]//2006 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 18-22 June 2006, Jeju, South Korea:2006 1-6
- [4] Marius Fatu, Cristian Lascu, Gheorghe-Daniel Andreescu, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg, Ion Boldea. Voltage Sags Ride-Through of Motion Sensorless Controlled PMSG for Wind Turbines[C].Industry Applications Conference, 2007.42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE 23-27 Sept.2007 Page(s):171-178
- [5] 胡书举,李建林,许洪华.永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J].电力系统自动化.2007,31(17):73-77
- [6] Nicholas P.W.Strachan,Dragan Jovcic.Dynamic Modelling, Simulation and Analysis of an Offshore Variable-Speed Directly-Driven Permanent-Magnet Wind Energy Conversion and Storage System(WECSS)[C].OCEANS 2007 - Europe18-21 June 2007 Page(s):1 - 6
- [7] 刘其辉,贺益康,赵仁德.变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J].电力系统自动化,2003,27(20):62-67
- [8] 尹明,李庚银,张建成,赵巍然,薛轶峰.直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J].电网技术,2007,31(15):61-65
- [9] 瞿兴鸿,廖勇,姚骏,刘刃.永磁同步风力发电系统的并网变流器设计[J].电力电子技术,2008,42(3):22-24
- [10] 张崇巍,张兴.PWM整流器及其控制[M].机械工业出版社,2003

作者简介:

杨晓萍(1964-),女,陕西西安人,汉族,副教授,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力电子在电力系统中的应用。

段先锋(1974-),男,陕西西安人,汉族,硕士研究生,研究方向为风力发电运行与控制。E-mail: jduan1@yahoo.com

冯帆(1981-),男,甘肃兰州人,汉族,硕士研究生,研究方向为FACTS技术在电力系统中的应用。