

变速恒频双馈风力发电机投切控制策略

杨淑英¹, 张兴¹, 张崇巍¹, 谢震¹, 曹仁贤²

- (1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009;
2. 合肥阳光电源有限公司, 安徽省 合肥市 230088)

Cut-in/out Control Strategies for Doubly Fed Induction Generator Driven by Variable-speed Wind Turbine

YANG Shu-ying¹, ZHANG Xing¹, ZHANG Chong-wei¹, XIE Zhen¹, CAO Ren-xian²

- (1. School of Electric Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China;
2. Hefei Sunlight Power Supply Co. Ltd., Hefei 230088, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Several cut-in control strategies for doubly fed induction generator (DFIG)-based variable-speed constant-frequency (VSCF) wind power generation are studied in the paper. The stator voltage open loop control-based cut-in control strategy is easy to be tuned, but the control precision of the no-load stator voltages cannot be guaranteed. In another control strategy with stator voltage RMS close loop control, the control precision is improved, however, the disadvantages in stator voltage symmetry and in no-load stator voltage waving are still not improved very well. The control strategy with stator voltage space vector close loop control not only can guarantee the control precision of the stator voltages, but also can eliminate the stator voltage waving at slip frequency, when a specific controller is adopted. For the voltage space vector close loop control-based strategy, based on the proportional-plus-integral (PI)-based control scheme, a new control scheme composed of an adaptive resonant controller and a PI controller is proposed in the paper, by which the stator voltage waving is almost eliminated, and a very well control performance is achieved for stator voltages, naturally, the softly cut-in control is realized. The results of simulation and experiments have validated the theoretical analysis and the designs of the cut-in/out control strategies.

KEY WORDS: cut-in/out control; no-load stator voltages; variable-speed constant-frequency; wind power generation; doubly fed induction generator

摘要: 对几种变速恒频双馈风力发电投切控制策略进行深入的研究。基于电压开环控制的投切控制策略, 虽具有较好的稳定性, 但空载定子电压的控制精度受到限制; 基于电压有效值闭环的投切控制策略, 虽能提高定子空载电压的控制精

度, 但在定子电压的三相对称性及定子电压幅值的波动方面仍存在欠缺; 基于空间电压矢量闭环控制的投切控制策略, 若采用特定的调节器设计, 不仅能确保电压控制精度, 而且可以有效抑制定子电压幅值的波动。针对基于空间电压矢量闭环控制的这一投切方案, 在 PI 调节器控制的基础上提出了自适应谐振调节器与 PI 调节器并行控制的控制策略, 有效抑制了定子电压幅值的波动, 使定子电压具有较好的控制响应, 进而实现了双馈风力发电机零电流切入电网的目的。仿真与试验验证了理论分析及方案设计的正确性。

关键词: 投切控制; 空载定子电压; 变速恒频; 风力发电; 双馈电机

0 引言

在基于双馈电机的变速恒频风力发电系统中, 尤其是兆瓦级大功率的场合, 双馈发电机的投切控制对双馈风力发电系统的安全运行起至关重要的作用^[1-4]。双馈发电机的投切控制包括切入、切出控制。切入控制包含双馈发电机的空载运行过程, 这一过程与并网发电时的控制策略有较大差异。而在切出控制过程中, 由于双馈发电机的定子仍然与电网相连, 其控制策略与并网发电时的控制基本一致。

双馈风力发电系统的投切控制要求是在零电流的情况下使双馈发电机切入或切出电网, 从而减少风力发电系统的投切过程对电网的冲击^[5], 使系统安全可靠的运行, 同时也有效延长发电系统的使用寿命, 降低其运行和维护成本。基于双馈发电机的变速恒频风力发电系统的切入控制与其它变速及定速风力发电系统的切入控制不同^[1], 在基于双馈电机的变速恒频风力发电系统中, 双馈电机与电网之

间为“柔性连接”^[3,6],即在转子励磁变流器容量容许的范围内,双馈发电机定子电压的频率和幅值大小不受其转子转速的限制。正是这一特性使双馈发电机在其转速到达变流器容许的调速范围后,可以根据电网电压需要实时的改变转子励磁电流大小、频率及相位、相序等,从而使双馈发电机的定子电压跟随电网电压,实现零电流切入^[7-8]。双馈发电机的切出过程是一个使其定子电流逐渐减小到零的过程,该过程首先将转子电流中的转矩分量减小到零,然后调整其励磁电流使其定子电流为零,从而使双馈电机在定子零电流情况下从电网脱开。

实现双馈风力发电系统零电流切入的关键是双馈电机空载定子电压的控制,目前主要有3种控制策略,电压开环控制策略^[1,9-10]、电压有效值闭环的控制策略及基于空间电压矢量的瞬时值闭环控制策略。进一步研究发现,因受转子侧变流器输出电压中直流分量的影响,以上3种空载定子电压控制策略中,定子电压幅值均存在不同程度的波动。针对于此,提出一种新的空间电压矢量闭环控制策略,该控制策略采用PI调节器与自适应谐振调节器并行控制的控制方案,能完全消除定子电压幅值的波动,使双馈风力发电系统取得良好的切入控制性能。

1 双馈电机的空载数学模型

由于空载控制的目的是使双馈电机的定子电压跟随电网电压,因此,采用同步旋转坐标系时,该坐标系与双馈电机并网发电时相同,仍采用电网电压定向,即以电网电压空间矢量的方向为 q 轴方向,顺时针旋转 90° 的方向为 d 轴的方向^[11-13]。在此坐标系中,若采用电动机惯例,并且在定子电流为零的情况下可得双馈电机的空载数学模型为^[3,10,14-15]:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = \psi_s = L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = 0 = L_m i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\begin{cases} u_{sq} = \omega_s \psi_{sd} \\ u_{sd} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{rq} = R_r i_{rq} + L_r di_{rq} / dt + \omega_{sl} L_r i_{rd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + L_r di_{rd} / dt - \omega_{sl} L_r i_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 分别为定子磁链在 d 、 q 轴上的分量; ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为转子磁链在 d 、 q 轴上的分量; L_m 、 L_r 分别为 dq 坐标系中定、转子间的等效互感和转子

绕组的等效自感; i_{rd} 、 i_{rq} 分别为转子电流的 d 、 q 轴上的分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为定子电压在 d 、 q 轴上的分量; u_{rd} 、 u_{rq} 分别为转子电压在 d 、 q 轴上的分量; ω_s 为同步旋转角频率; ω_{sl} 为转差角频率; R_r 为转子绕组的电阻。

2 电压开环控制的软切入控制策略

根据式(4)不难分析,通过控制 u_{rd} 、 u_{rq} 便可以控制 i_{rd} 、 i_{rq} 。当采用电流闭环控制时,若PI调节器的输出分别为 u'_{rd} 、 u'_{rq} ,并用以控制式(4)中 i_{rd} 、 i_{rq} 的微分项和比例项时,则控制方程为

$$\begin{cases} u_{rq} = u'_{rq} + \omega_{sl} L_r i_{rd} \\ u_{rd} = u'_{rd} - \omega_{sl} L_r i_{rq} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可以设计基于前馈解耦的电压开环控制策略。电压开环控制策略的突出优点是节省了电压传感器且较易实现。但其电压控制精度较差,这就使在双馈电机切入电网时仍有一定的冲击电流。电压开环控制策略的控制结构如图1所示^[10]。

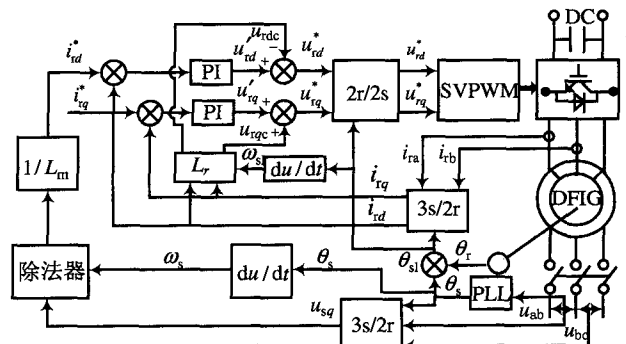


图1 电压开环控制

Fig. 1 Open loop control strategy

在将式(5)中交叉耦合项作为扰动项前馈补偿后,可得双馈电机空载情况下电流内环被控对象的传递函数为

$$G_i(s) = I_{rd(q)}(s) / U'_{rd(q)}(s) = 1 / (L_r s + R_r) \quad (6)$$

根据式(6)便可以对双馈电机转子侧变流器的电流内环闭环控制系统进行设计。由式(1)和式(3)可知,空载时定子电压的大小取决于转子电流的 d 轴分量 i_{rd} 。联合式(1)、(3),可得转子电流的 d 轴分量参考值为

$$i_{rd}^* = u_{sq}^* / \omega_s L_m \quad (7)$$

式中: u_{sq}^* 为参考电压,由电网电压检测获得。由于空载控制时双馈电机的转矩为零,因此双馈电机转子电流的转矩分量也为零,即 q 轴分量 i_{rq} 的参考值 i_{rq}^* 应为0。

由以上分析可以看出，上述控制策略没有直接对双馈电机定子电压实施闭环控制，其控制精度受到电机参数的准确性及转子侧变流器的特性等影响，因此，难以准确实现零电流投切的目的，如在电机互感 L_m 减少 5% 时(图 2 中 0.5s 时刻)，定子电压的幅值将增加 20V。

另外，由于直流母线电压的波纹、功率器件特性的离散性及 AD 采样和控制算法的截断误差等原因使转子电势中含有直流分量，此直流分量又以同步发电机的原理感应到定子侧，造成定子电压幅值的波动，其波动频率为转差频率，如图 2 所示。

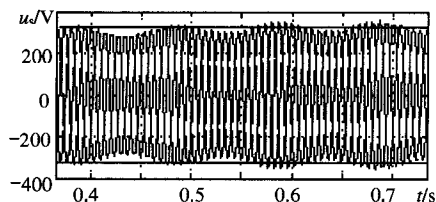
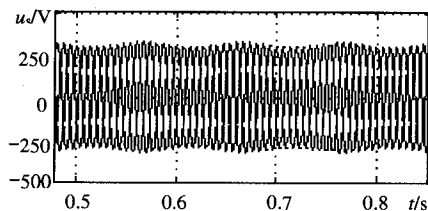
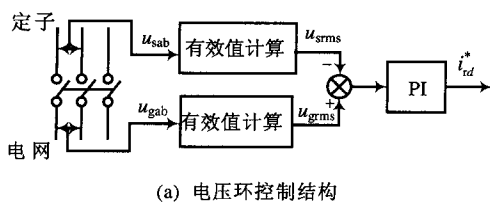


图 2 定子电压波形
Fig. 2 Waveforms of the stator voltages

3 定子电压有效值闭环的软切入控制策略

针对定子电压开环控制策略难以保证定子电压对电网电压稳态控制精度的缺陷，可采用电压有效值闭环的控制策略。在该控制策略中，转子电流 q 轴分量的参考值与电压开环控制时相同，依然为零，而转子电流 d 轴分量的参考值由电压有效值调节器的输出给定，如图 3(a)所示。

显然图 3 所示的电压有效值闭环控制策略，能提高定子电压的稳态控制精度，对转子电势直流分量所导致的定子电压波动也有所改善，但定子电压幅值依然存在较大波动，如图 3(b)所示。



(b) 定子电压的波动
图 3 电压有效值闭环控制
Fig. 3 Voltage RMS close loop control

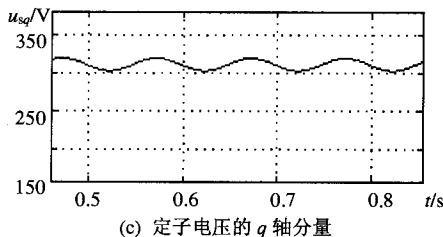
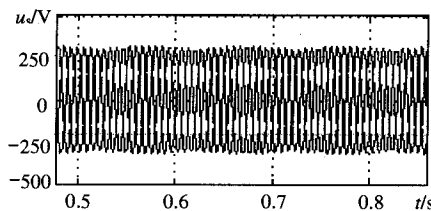
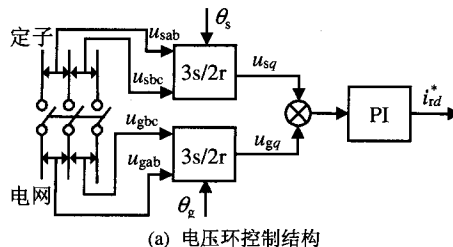
4 定子空间电压矢量闭环控制的软切入控制

4.1 基于 PI 调节器的空间电压矢量闭环的软切入控制

为了有效抑制定子电压幅值的波动，可采用基于空间电压矢量的电压瞬时值闭环控制策略。在该控制策略中转子电流 q 轴分量的参考值依然为零，而转子电流 d 轴分量的参考值由空间电压矢量调节器获得，如图 4(a)所示。

由于在电压空间矢量定向的 dq 同步坐标系中，定子电压和电网电压的 d 轴分量均为零，当采用等量坐标变换时，电压 q 轴分量的大小等于电压空间矢量的幅度。因此，在图 4(a)中可以用定子电压与电网电压的 q 轴分量进行控制，其调节器的输出即为转子电流 d 轴分量的参考值。

当电压控制采用 PI 调节器时，该控制策略对定子三相电压的对称性及定子电压幅值的低频波动都有较大改善，但定子电压幅值的波动依然没有消除，如图 4(b)所示。这是由 PI 调节器本身特性决定的，由于低频波动量为转差频率的交流量，如图 4(c)所示，而 PI 调节器对交流量的增益并非为无穷大，即 PI 调节器对交流量的控制只能是有差控制。



(c) 定子电压的 q 轴分量
图 4 空间电压矢量闭环控制
Fig. 4 Voltage space vector close loop control

4.2 空间电压矢量闭环控制策略的改进

通过对图 4 中波形的分析发现，为了能彻底消除定子电压的低频波动，必须使调节器具有对转差

频率交流量的控制增益为无穷大的能力。因此,可以在电压调节器中加入自适应谐振调节器与PI调节器并行控制,且使其谐振频率随转差频率的变化而变化。自适应谐振调节器的表达式为

$$G_C(s) = K_C \frac{(s+a)(s+b)}{s^2 + \omega_{s1}^2} \quad (8)$$

式中: a 、 b 为用于配置系统的零点位置; K_C 为调节器系数; ω_{s1} 为调节器的谐振频率。

为便于 DSP 实现,可利用状态方程描述谐振调节器如下:

$$G_C(s) = K_1 + \frac{K_2 s + K_3 \omega_{s1}}{s^2 + \omega_{s1}^2} \quad (9)$$

式中: $K_1 = K_C$; $K_2 = K_C(a+b)$; $K_3 = K_C(ab - \omega_{s1}^2) / \omega_{s1}$ 。

式(9)的状态空间方程可描述为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + du \end{cases} \quad (10)$$

式中: x 为状态变量; u 为输入量; y 为输出量,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{s1} \\ -\omega_{s1} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} K_2 \\ K_3 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0], d = K_1。$$

由式(10)不难求出其状态转移矩阵为

$$\Phi(t) = L^{-1}[(sI - A)^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos \omega_{s1} t & \sin \omega_{s1} t \\ -\sin \omega_{s1} t & \cos \omega_{s1} t \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中, I 为单位矩阵。

因此,可得谐振调节器的离散时域方程为

$$\begin{cases} x(n+1) = Px(n) + Qu(n) \\ y(n) = Cx(n) + du(n) \end{cases} \quad (12)$$

其中,系数矩阵分别为

$$\begin{cases} P = \Phi(T_s) = \begin{bmatrix} \cos \omega_{s1} T_s & \sin \omega_{s1} T_s \\ -\sin \omega_{s1} T_s & \cos \omega_{s1} T_s \end{bmatrix} \\ Q = \left[\int_0^{T_s} \Phi(t) dt \right] B = \\ \frac{1}{\omega_{s1}} \begin{bmatrix} K_2 \sin \omega_{s1} T_s - K_3 \cos \omega_{s1} T_s + K_3 \\ K_2 \cos \omega_{s1} T_s + K_3 \sin \omega_{s1} T_s - K_2 \end{bmatrix} \\ C = [1 \ 0], d = K_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_s 为离散采样周期; $x(n)$ 、 $u(n)$ 、 $y(n)$ 分别为状态变量、输入变量及输出量的第 n 次采样值; $x(n+1)$ 为状态变量的第 $n+1$ 次值。

式(12)表明,当已知离散系统的第 n 次采样值时,就可以求出第 n 次输出值 $y(n)$ 及第 $n+1$ 次状态值 $x(n+1)$ 。

采用自适应谐振调节器后的空间电压矢量闭环控制策略中的定子电压仿真波形如图 5 所示。

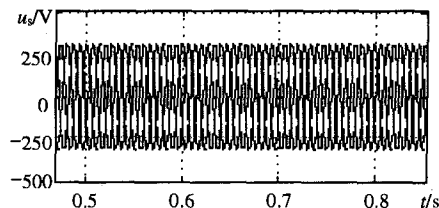


图 5 改进后的空载定子电压

Fig. 5 No-load stator voltage waveforms with improved space vector close loop control

5 软切出控制

基于双馈电机的变速恒频风力发电系统,在风速达到最低允许风速(切入风速)后开始实施切入控制,使空载定子电压较好的跟随电网电压,将双馈电机在零电流的情况下切入电网,然后对双馈风力发电系统实施并网发电控制。

在风力切入电网后,根据风速大小的不同会实施不同的控制策略,包括最大功率点追踪控制(MPPT)、变桨距控制及恒功率控制等。在双馈电机并网发电过程中,本文采用外功率环内电流环的双环控制策略,实施功率跟踪控制,其有功功率和无功功率指令分别由上位机的监控软件产生,有功功率和无功功率调节器的输出分别作为转子电流的转矩分量与励磁分量的指令值实施控制。

风速超过一定风速时(如 22m/s),便会将风机从电网切出,即软切出控制^[16]。软切出过程是软切入过程的逆过程,在该过程中首先将转子电流的转矩分量逐渐减小到零,然后再逐渐调整转子电流的励磁分量,直至定子电流减小到零后,将双馈电机在定子零电流的情况下与电网脱开,完成软切出过程。

6 实验研究

为从实验的角度验证、分析所提控制策略的正确性,构建了一套基于双馈电机的变速恒频风力发电模拟系统。该系统主要由 PC 机、笼型异步电机、变频器、双馈感应电机及背靠背(back-to-back)双向 PWM 变流器构成,其中,PC 机用于执行在 Labview 环境下开发的监控软件,起系统监控和风速模拟的作用;变频器和笼型异步电机用于模拟风力机,执行 PC 机发出的指令;双向背靠背变流器按照 PC 机发的指令驱动双馈电机。双馈感应电机的参数为:额定功率 110kW;极对数 3;频率 50Hz;额定转速 990r/min;定、转子绕组接线方式 Δ/Y ;定子额定电压 380V,额定电流 214A;转子开路电压 505V,额定电流 132A。背靠背双向变流器容量为 40kW,主

电路开关管采用 IPM 智能模块, 网侧变流器交流感抗为 0.7mH , 直流侧滤波电容为 13.2mF , 主控制芯片为两块数字信号处理器(DSP TMS320LF2407A)。

图 6 分别为定子电压开环、定子电压有效值闭环、基于 PI 调节器的空间电压矢量闭环、改进后的空间电压矢量闭环控制的双馈感应电机空载定子电压波形及定子相电压与电网相电压的对比。图 6 所示波形均在 900r/min 的情况下测得, 其中, 图 6(a) 所示定子电压开环控制时空载定子电压的幅值波动量约为 17% ; 图 6(b) 所示有效值闭环控制时对空载定子电压幅值波动略有改善, 其波动量约为 15% ; 采取空间电压矢量闭环控制后, 定子电压幅值的波动有较大改善, 图 6(c) 所示, 其波动量约为 5% ; 在空间电压矢量闭环控制策略中, 若采用本文所提出的 PI 调节器与自适应谐振调节器共同调节的控制策略, 空载定子电压幅值的波动量几乎为零, 如图 6(d) 所示, 图 6(e) 为定子电压与电网电压的波形对比, 表明定子电压能够较好的跟随电网电压。

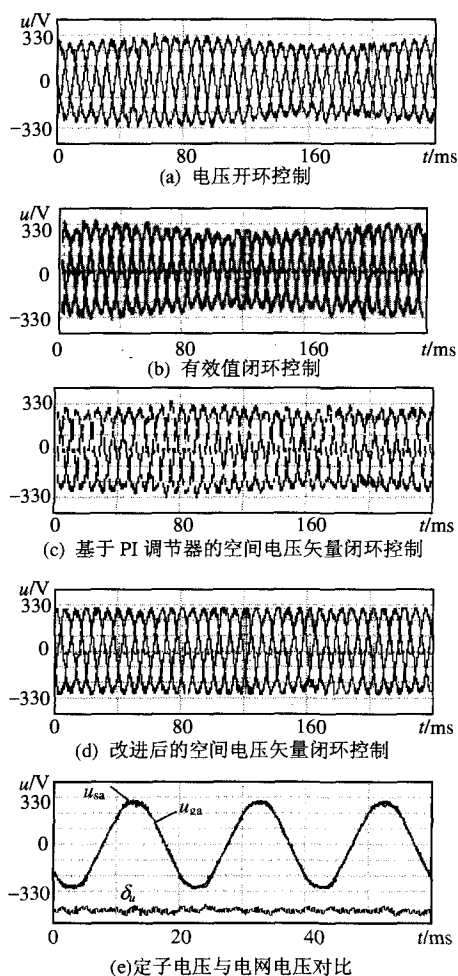


图 6 空载定子电压的实验波形

Fig. 6 No-load stator voltage waveforms

双馈感应电机切入过程中的定子电流、稳态并网发电时的定子电流及切出过程中的定子电流如图 7 所示。图 7(a)、(c) 表明双馈电机的软投切控制得以较好的实现, 图 7(b) 表明双馈风力发电系统取得了较好的定子电流控制效果。

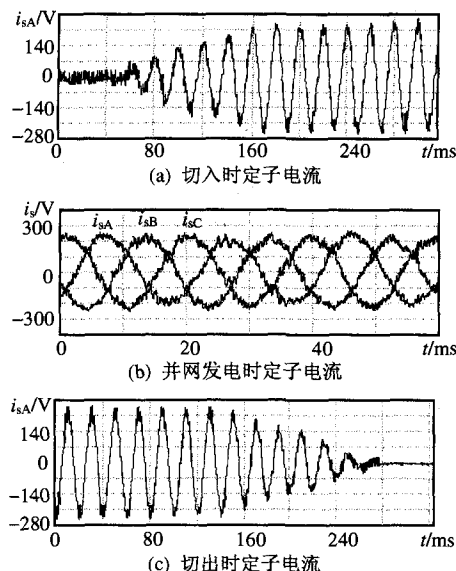


图 7 切入过程及切入后定子电流

Fig. 7 Stator currents in cut-in/out process and in grid-connected process

7 结论

投切控制策略是基于双馈电机的变速恒频风力发电系统较为关键的控制策略, 良好的投切控制是使双馈风力发电系统安全运行的前提, 而投切控制的关键是双馈电机的空载控制, 转子电动势的直流偏量极大的影响了双馈电机的空载定子电压波形。本文对电压开环控制、电压有效值闭环控制、空间电压矢量瞬时值闭环控制等几种控制策略进行了深入研究。仿真与实验表明基于 PI 调节器和自适应谐振调节器并行控制的空间电压矢量闭环控制能取得较好的空载电压控制效果。

参考文献

- [1] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.
Liu Qihui, He Yikang, Bian Songjiang. Study on the no-load cutting-in cutting-in control of the variable-speed constant-frequency (VSCF) wind-power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11(in Chinese).
- [2] 孟岳勇, 谢少军. 基于 DSP 的异步风力发电机软并网控制器的设计[J]. 电气开关, 2003, 41(6): 27-30.
Meng Yueyong, Xie Shaojun. Design of the grid connection controller for wind turbine asynchronous generator based on DSP[J]. Electric Switchgear, 2003, 41(6): 27-30(in Chinese).

- [3] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机并网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 51-70.
Liu Qihui, He Yikang, Zhang Jianhua. Grid connection control strategy of AC-excited variable-speed constant-frequency wind power generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 51-70(in Chinese).
- [4] 苑国锋, 李永东. 变频技术在变速恒频异步风力发电系统中的应用[J]. 变频器世界, 2005, 9: 6-11.
Yuan Guofeng, Li Yongdong. The application of converter technique in variable speed constant frequency wind power generation system [J]. The World of Inverters, 2005, 9: 6-11(in Chinese).
- [5] Yuan Guofeng, Chai Janyun, Li Yongdong. Vector control and synchronization of doubly fed induction wind generator system [C]. IPEMC2004, Xi'an, China, 2004.
- [6] 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, 22(20): 62-67.
Liu Qihui, He Yikang, Zhao Rende. The maximal wind energy tracing control of a variable-speed constant-frequency wind power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 22(20): 62-67(in Chinese).
- [7] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.
Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).
- [8] 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.
Yuan Guofeng, Chai Jianyun, Li Yongdong. Study on excitation converter of variable speed constant frequency wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 90-94(in Chinese).
- [9] 赵栋利, 许洪华, 赵斌, 等. 变速恒频风力双馈发电机并网电压控制研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 588-591.
Zhao Dongli, Xu Honghua, Zhao Bin, et al. Study on the cut-in voltage control of a variable speed constant frequency doubly fed induction generator[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(5): 588-591(in Chinese).
- [10] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
Liu Qihui, He Yikang, Zhang Jianhua. Operation control and modeling-simulation of AC-excited variable-speed constant frequency (AEVSCF) wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 43-50(in Chinese).
- [11] 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. Study 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(in Chinese).
- [12] Petersson A, Harnfors L, Thiringer T. Comparison between stator-flux and grid-flux-oriented rotor current control of doubly-fed induction generators[C]. IEEE PESC' 04, Aachen, Germany, 2004.
- [13] Peresada S, Tilli A, Tonielli A. Indirect stator flux-oriented output feedback control of a doubly fed induction machine[J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2003, 11(6): 875-888.
- [14] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proc. on Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231-241.
- [15] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105(in Chinese).
- [16] 王志华, 李亚西, 赵栋利, 等. 变速恒频风力发电机最大功率跟踪控制策略的研究[J]. 可再生能源, 2005, 2: 15-19.
Wang Zhihua, Li Yaxi, Zhao Dongli, et al. Research on control strategy of maximum power tracking of VSCF wind generation [J]. Renewable Energy, 2005, 2: 15-19(in Chinese).

收稿日期: 2006-12-24.

作者简介:

杨淑英(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, 目前主要从事大功率风力发电用并网变流器及逆变器并联运行等方面的研究, yangsyhfah@sohu.com;

张兴(1963—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动, 目前主要从事大功率风力发电用并网变流器、轻型直流输电及大型光伏并网发电等方面的研究;

张崇巍(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事风力发电、特种电源、运动控制及智能控制等方面的研究。

(编辑 王剑乔)