

双馈风机转子侧变流器不平衡控制策略

刘国华,洪丹,王瑞,孙素娟
(南京南瑞集团公司,江苏南京 211006)

摘要:根据双馈发电机在正反向同步旋转坐标系下的数学模型,提出一种以电磁转矩恒定为控制目标的不对称控制策略,对转子电流控制器进行改进,采用比例—积分—谐振(PIR)控制器以控制2倍同步频率的交流分量,并分析了转子侧变流器不对称受控范围。该方案不需要增加负序控制器,也无需对转子电流进行正负序分离,易于工程实现。仿真验证了该控制方法的有效性。

关键词:双馈风机;不对称;抑制电磁转矩波动;PIR控制

中图分类号:TM614;TM76

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2015)02-0005-05

近来,国内外风电并网标准对风机故障穿越能力和风电网适应性均提出较高要求,其中都要求风机具备在电网电压三相不平衡条件下稳定可靠运行的能力。对于当前应用较广泛的双馈风机,若控制器采用按电压三相平衡条件处理的传统矢量控制策略,则较小的电网电压不平衡可导致风机子输出定子电流不平衡且功率含2倍电网频率波动,同时电磁转矩的2倍频脉动将对风机转轴系统造成机械应力冲击,产生噪音,并影响机械部件使用寿命^[1-3]。双馈风机需通过网侧变流器和转子侧变流器的改进控制来削弱电网电压不平衡对系统的影响。

目前,网侧变流器的不平衡控制研究和工程应用已相对成熟,但转子侧变流器的不平衡控制策略仍处在研究和验证中。现有研究一般基于正、反向同步旋转坐标系建立不平衡电网电压下的双馈发电机数学模型,将不平衡条件下的系统分解成正、负序对称系统。文献[1-3]采用一种典型的不平衡控制结构,在正、反向双同步旋转坐标系下对双馈发电机转子电流的正、负序分量分别进行控制,该方法包含两套矢量控制算法,需同时完成定子电压、定子电流和转子电流的相序分离,系统复杂,实用性有待检验。文献[4,5]提出采用基于正序两相静止坐标系的比例—谐振(PR)转子电流控制方法,文献[6-8]提出基于正序同步旋转坐标系下的比例—积分—谐振(PIR)控制方法,仅需在平衡条件矢量控制策略的基础上增加谐振频率为2倍电网频率的电流谐振调节器,算法改动小,动态性能好,具有较好的工程实用性。

1 双馈发电机数学模型

双馈风机通过控制转子侧变流器提供的转子励磁电压实现变速恒频运行。基于对称分量法,三相不平衡电压或电流可分解得到的正、负序分量。采用正、反向

同步旋转坐标系进行分析,正转坐标下正序和负序分量分别表现为直流和2倍电网频率的交流分量,其中2倍频分量可以转换为反向同步旋转坐标系下的直流分量,从而可以在正、反转同步坐标系下建立完整的数学描述。双馈发电机的定子和转子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{sdq+}^+ = R_s i_{sdq+}^+ + \frac{d\Psi_{sdq+}^+}{dt} + j\omega_s \Psi_{sdq+}^+ \\ u_{sdq-}^- = R_s i_{sdq-}^- + \frac{d\Psi_{sdq-}^-}{dt} + j\omega_s \Psi_{sdq-}^- \\ u_{rdq+}^+ = R_r i_{rdq+}^+ + \frac{d\Psi_{rdq+}^+}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \Psi_{rdq+}^+ \\ u_{rdq-}^- = R_r i_{rdq-}^- + \frac{d\Psi_{rdq-}^-}{dt} + j(-\omega_s - \omega_r) \Psi_{rdq-}^- \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{cases} \Psi_{sdq+}^+ = L_s i_{sdq+}^+ + L_m i_{rdq+}^+ \\ \Psi_{sdq-}^- = L_s i_{sdq-}^- + L_m i_{rdq-}^- \\ \Psi_{rdq+}^+ = L_r i_{rdq+}^+ + L_m i_{sdq+}^+ \\ \Psi_{rdq-}^- = L_r i_{rdq-}^- + L_m i_{sdq-}^- \end{cases} \quad (2)$$

式(1,2)中: ω_s 为定子电角速度,等于定子电角速度,等于电网同步角速度, ω_r 为转子电角速度; R_s, R_r 为定转子电阻; L_s, L_r 为定转子绕组的自感; u, i, Ψ 分别为电压、电流和磁链,上标中+,-分别为正、反向dq旋转坐标系,下标中+,-分别为正、负序分量,下标s,r分别为定子和转子。以电压为例, u_{sdq+}^+, u_{sdq-}^- 分别为基于正向dq坐标系的定子电压正序分量和基于反向dq坐标系的定子电压负序分量。

由式(2)得定子电流和转子磁链为:

$$\begin{cases} i_{sdq+}^+ = \frac{1}{L_s} (\Psi_{sdq+}^+ - L_m i_{rdq+}^+) \\ i_{sdq-}^- = \frac{1}{L_s} (\Psi_{sdq-}^- - L_m i_{rdq-}^-) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Psi_{rdq+}^+ = \frac{L_m}{L_s} \Psi_{sdq+}^+ + \sigma L_r i_{rdq+}^+ \\ \Psi_{rdq-}^- = \frac{L_m}{L_s} \Psi_{sdq-}^- + \sigma L_r i_{rdq-}^- \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ 。

联立式(1)和式(4)可得转子电压方程:

$$\begin{cases} u_{rdq+}^+ = R_r i_{rdq+}^+ + \sigma L_r \frac{di_{rdq+}^+}{dt} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\Psi_{sdq+}^+}{dt} + \\ \quad j(\omega_s - \omega_r) \left(\sigma L_r i_{rdq+}^+ + \frac{L_m}{L_s} \Psi_{sdq+}^+ \right) \\ u_{rdq-}^- = R_r i_{rdq-}^- + \sigma L_r \frac{di_{rdq-}^-}{dt} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\Psi_{sdq-}^-}{dt} + \\ \quad j(-\omega_s - \omega_r) \left(\sigma L_r i_{rdq-}^- + \frac{L_m}{L_s} \Psi_{sdq-}^- \right) \end{cases} \quad (5)$$

双馈发电机电磁转矩为:

$$T_e = -\frac{3L_m}{2L_s} n_p \text{Im}[\Psi_s i_r] \quad (6)$$

式(6)中: n_p 为电机极对数。

由于负序分量的存在,发电机电磁转矩存在 2 倍电网频率的波动,则:

$$T_e = T_{e0} + T_{es2} \sin(2\omega_s t) + T_{ec2} \cos(2\omega_s t) \quad (7)$$

式(7)中: T_{e0} , T_{es2} 和 T_{ec2} 分别为电磁转矩平均值、正弦项和余弦项谐波峰值。

由定子磁链和转子电流表示为:

$$\begin{bmatrix} T_{e0} \\ T_{es2} \\ T_{ec2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} n_p \begin{bmatrix} -\Psi_{sq+}^+ & \Psi_{sd+}^+ & -\Psi_{sq-}^- & \Psi_{sd-}^- \\ \Psi_{sd-}^- & \Psi_{sq-}^- & -\Psi_{sd+}^+ & -\Psi_{sq+}^+ \\ -\Psi_{sq-}^- & \Psi_{sd-}^- & -\Psi_{sq+}^+ & \Psi_{sd+}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd+}^+ \\ i_{rq+}^+ \\ i_{rd-}^- \\ i_{rq-}^- \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 转子侧变流器不平衡控制策略

常规并网条件下,双馈转子侧变流器一般采用基于定子电压或定子磁链定向的双闭环双 PI 结构矢量控制,外环为定子输出有功和无功功率控制环,跟踪功率指令得到转子电流给定,内环为转子 dq 轴电流控制环,跟踪外环输出的转子电流给定得到的转子电压指令^[9,10]。电网电压不平衡条件下,上述常规控制方法中 PI 控制器对 2 倍频率交流量的控制能力不足。本文为实现对负序分量的有效控制,转子电流内环采用基于正转同步旋转坐标系下的 PIR 控制器,对转子电流正负序分量同时控制,无需提取实时转子电流负序分量。此外,为提高对外环负序给定的跟踪速度,对外环控制进行简化,转子负序电流给定值根据不同的控制目标通过直接计算获得,仅转子正序电流给定值保留常规控制中的 PI 跟踪方法。上述设计保证了本文所采用的控制策略具有结构简单、易于工程实现的特点。具体的控制设计如图 1 所示。

首先检测得到定子电压和电流三相值,通过坐标变换和 100 Hz 的 2 阶陷波器分别提取正转 dq 坐标下

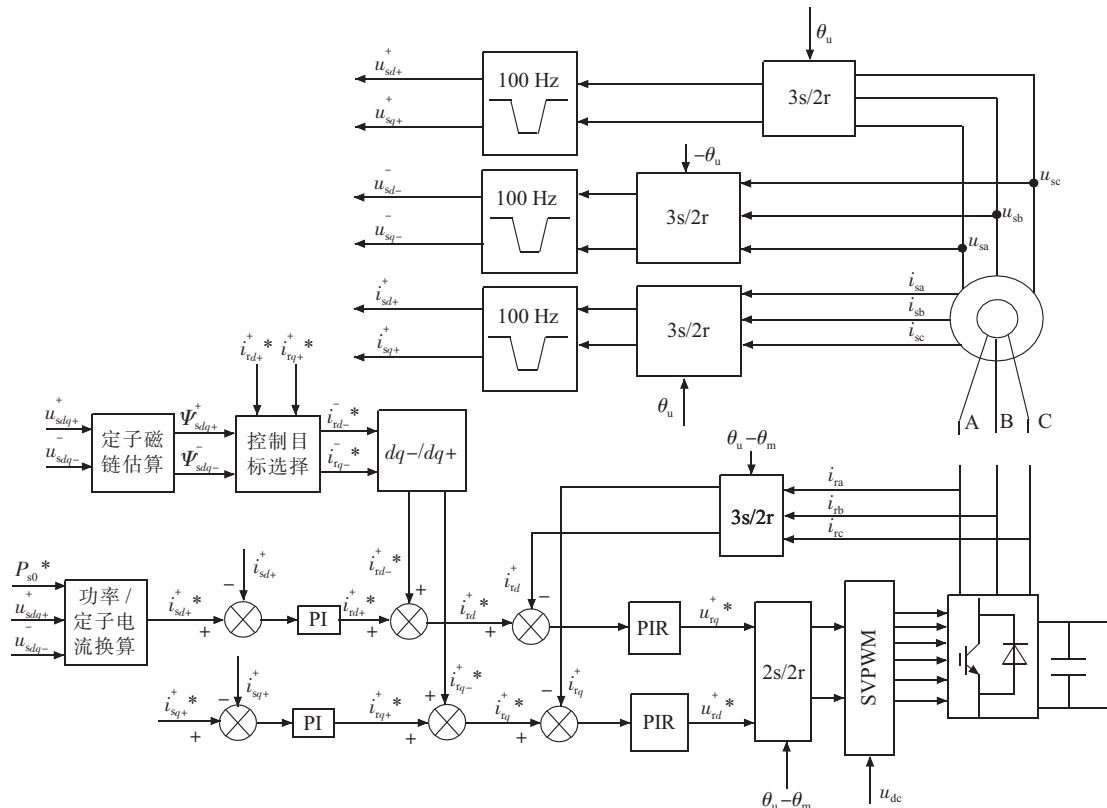


图 1 双馈风机转子侧变流器控制框图

的定子电压正序分量 u_{sdq+}^+ 和反转 dq 坐标下的定子电压负序分量 u_{sdq-}^- , 以及正转 dq 坐标下的定子电流正序分量 i_{sdq+}^+ ; 将实时检测得到的转子电流三相值, 变换至正转 dq 坐标下, 即 i_{rdq}^+ , 不做正负序分离。再根据设定的负序控制目标和定子磁链估算值计算获取转子电流负序给定值 i_{rdq-}^- , 转换为正转 dq 坐标下得到 i_{rdq-}^+ , 与经过 PI 控制器跟踪正序定子电流给定值获得的转子电流正序给定值 i_{rdq+}^+ 相叠加, 得到正转 dq 坐标的转子电流给定 i_{rdq}^+ 。将基于正转 dq 坐标的转子电流实际值 i_{rdq}^+ 与转子电流给定值 i_{rdq}^+ 比较求差, 通过 PIR 控制器跟踪控制, 输出作为转子电压控制给定 u_{rdq}^+ 。根据工程经验, 转子电流内环 dq 轴间的交叉耦合, 其带来的稳态影响通常在允许范围内, 故本文不做解耦和补偿的处理。

2.1 抑制电磁转矩波动的控制方法

考虑到电网不平衡引起的发电机电磁转矩波动会对风机转轴系统造成机械应力冲击, 产生噪音并影响机械系统使用寿命, 因此本文将抑制电磁转矩波动作为控制目标, 即电磁转矩 2 倍频率谐波的正弦项和余弦项均为 0, $T_{es2} = T_{ec2} = 0$ 。当采用电网电压矢量定向控制时, 忽略定子磁链暂态过程, 由式(8)得:

$$\begin{cases} \Psi_{sd+}^- i_{rd+}^+ + \Psi_{sq+}^- i_{rq+}^+ - \Psi_{sq+}^+ i_{rq-}^- = 0 \\ -\Psi_{sd+}^- i_{rd+}^+ + \Psi_{sq+}^- i_{rq+}^+ - \Psi_{sq+}^+ i_{rq-}^- = 0 \end{cases} \quad (9)$$

推导得到电磁转矩无波动控制策略下转子负序电流给定值为:

$$\begin{cases} i_{rq-}^- = \frac{-\Psi_{sq+}^- i_{rd+}^+ + \Psi_{sd+}^- i_{rq+}^+}{\Psi_{sq+}^+} \\ i_{rd-}^- = \frac{\Psi_{sd+}^- i_{rd+}^+ + \Psi_{sq+}^- i_{rq+}^+}{\Psi_{sq+}^+} \end{cases} \quad (10)$$

观察式(10), 转子负序电流给定值需要计算定子磁链。由式(1), 忽略定子电阻影响和定子磁链的动态过程, 得到定子磁链的简化公式:

$$\begin{cases} \Psi_{sd+}^+ = \frac{u_{sq+}^+}{\omega_s} \\ \Psi_{sq+}^+ = -\frac{u_{sd+}^+}{\omega_s} \\ \Psi_{sd-}^- = -\frac{u_{sq-}^-}{\omega_s} \\ \Psi_{sq-}^- = \frac{u_{sd-}^-}{\omega_s} \end{cases} \quad (11)$$

此处估算出的磁链不参与闭环控制, 误差只影响控制目标的精度, 不会影响系统的稳定性。

2.2 PIR 控制器

转子电流环采用 PIR 控制器同时对直流量和 2 倍频交流量进行跟踪控制。通过在正序系统 PI 控制基础上附加一个谐振频率为 2 倍电网频率的谐振控制器实现, 其传递函数为:

$$G_{PIR}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{k_R \cdot 2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_1^2} \quad (12)$$

式(12)中: k_p, k_i 分别为比例、积分控制系数; $G_R(s) = \frac{k_R \cdot 2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_1^2}$ 构成适合数字实现的准谐振控制器; k_R 为准谐振基频增益; $2\omega_c$ 为控制器带宽, rad/s。

带宽 $2\omega_c$ 增大, 保持谐振频率 ω_1 处的增益不变, 则控制器在电压频率波动时也具有足够的幅值增益, 可降低谐振控制器对频率的敏感程度, 但过大的 $2\omega_c$ 将导致系统不稳定。根据电能质量标准, 一般电网电压频率允许波动范围为 ± 5 Hz 以内, 取准谐振控制器的带宽为 10 Hz, 可得 $\omega_c = 10\pi$ 。分别取 $k_R = 1$ 和 5, PIR 控制器的开环幅频特性如图 2 所示。与 PI 控制器相比, PIR 控制器在 100 Hz 频率点存在谐振峰, 开环幅值增益高, 这从理论上证明 PIR 控制器对负序量有效。

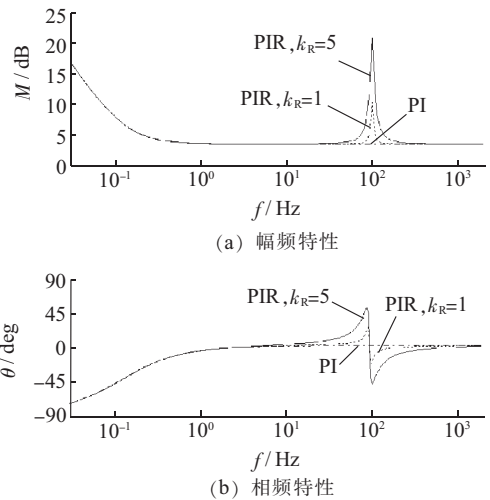


图 2 PIR 控制器的开环幅频特性

3 不平衡控制范围分析

在电网电压三相不平衡条件下, 即使采用三相不平衡控制策略, 也无法完全消除所有电量的负序分量。若不平衡度较高, 负序分量比重较大, 还将导致系统中部分电量超过运行限制。因此实际风机系统应有针对不平衡条件的相应保护设计和限幅措施。以下主要从变流器输出电压限制、输出电流限制以及发电机定、转子绕组的电流限制 3 个方面分析双馈发电机转子侧变流器不平衡控制的稳态受控范围。

3.1 变流器输出电压限制

变流器输出电压主要受直流母线电压及调制方式的限制。对于 SVPWM 调制, 转子侧变流器输出的相电压最大幅值为 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 。

忽略转子电阻 R_r 和发电机漏磁系数 σ , 根据式 (1—5), 可得到电机转子开口电压的稳态值(折算至定子侧)为:

$$U_r = U_r^+ + U_r^- = |s| \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot U + (2-s) \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot U_s^- \quad (14)$$

由式(14)可看出, 转子电压的幅值取决于电机的转差率及定子电压正负序分量。若近似认为电机转子电压等于转子侧变流器输出最大电压, 则上式折算回转子侧后的数值不应大于 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 。根据计算结果并结合仿真结果, 变流器输出电压限制下, 电机额定满功率运行时, 可承受的电压不平衡度临界值约为 11%。

3.2 变流器输出电流限制

稳态不对称控制运行时应考虑变流器硬件的电流额定容量, 目前 1.5 MW 和 2 MW 双馈风机所配转子侧变流器的额定电流通常为 580 A 和 780 A。在机侧不对称控制策略设计中, 应对转子电流作对应的限幅, 当检测到电流越限时, 限幅环节可采用等比例降低正序 d 轴和 q 轴电流给定, 保持负序 d 轴和 q 轴电流给定不变, 从而减小变流器的功率输出, 且维持并网运行状态。

3.3 电机运行电流限制

双馈异步发电机存在定转子绕组发热限制, 长期运行不应该超过其允许最大电流值, 若超过该限制同样需要对定子电流给定作相似的限幅处理。

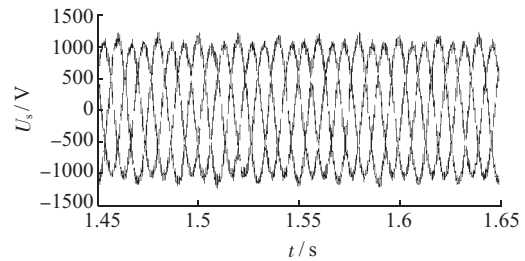
4 仿真实验

在 MATLAB/Simulink 环境中建立双馈风机并网仿真模型: 双馈风机额定功率 2 MW, 定子额定线电压为 690 V, 定子电阻为 0.0018Ω , 定子漏感为 0.076 mH, 转子电阻为 0.0014Ω , 转子漏感为 0.124 mH, 励磁电感为 3.65 mH, 直流母线电压额定值为 1100 V。网侧和转子侧变流器开关频率为 3.2 kHz。

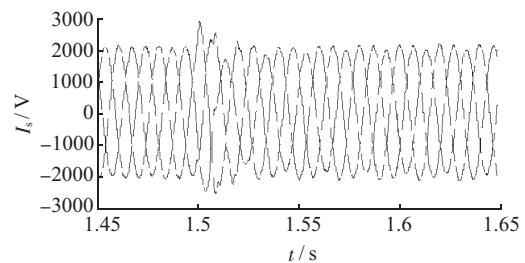
仿真条件设置: (1) 设置并网点电压两相跌落至 86% 额定值; (2) 定子无功指令为 0, 定子有功功率指令为 1750 kW; (3) 1.5 s 之前, 按照常规的矢量控制策略^[9,10]进行控制, 即图 1 中转子上环采用 PI 控制且不考虑负序控制目标; (4) 1.5 s 之后切换为本文所提控制策略, 见图 1, 转子电流内环采用 PIR 控制, 以电磁转矩稳定为控制目标。

仿真所得定子线电压、定子电流、转子电流和发电机电磁转矩波形如图 3 所示。对比 1.5 s 前后各电量波形可以看出, 采用本文所提不平衡控制策略可以实现

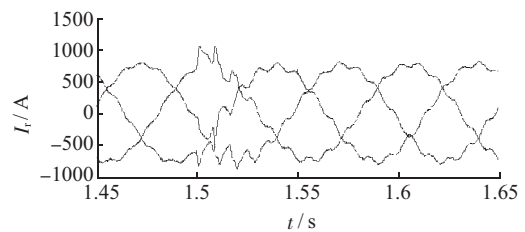
抑制不平衡电压引起的双馈发电机电磁转矩 2 倍电网频率脉动, 同时维持较好的定子输出电流和转子电流质量。



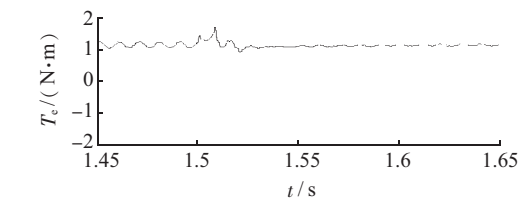
(a) 定子电压波形



(b) 定子电流波形



(c) 转子电流波形



(d) 电磁转矩波形

图 3 电网电压不平衡时的仿真波形

5 结束语

本文提出以抑制双馈发电机电磁转矩波动为控制目标的双馈转子侧变流器不平衡控制策略, 外环 PI 控制跟踪功率指令, 内环采用 PIR 控制器, 并详细分析了其固有的不平衡受控范围, 为实际运行中保护或限幅处理提供参考。所提控制方法仅需在常规矢量控制策略的内环增加谐振控制器即可, 无需提取转子电流负序分量, 易于工程实现。仿真结果表明该方法可有效跟踪控制负序电流, 能够实现抑制电磁转矩波动的控制目标。

参考文献:

- [1] XU L, WANG Y. Dynamic Modeling and Control of DFIG-based Wind Turbines Under Unbalanced Network Conditions [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2007, 22(1): 314-323.

- [2] 胡家兵,贺益康,郭晓明,等.不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制[J].电力系统及其自动化,2007,31(14):47-56.
- [3] 电网电压不平衡双馈风力发电机改进控制方法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(4):48-56.
- [4] 胡家兵,贺益康,王宏胜,等.不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变流器的比例—谐振电流控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(6):48-56.
- [5] 郑艳文,李永东,柴建云,等.不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(15):89-93.
- [6] 邹冬临,余岳,徐凤星,等.电网电压不对称跌落下双馈风力发电机机侧变流器控制策略的研究[J].电机与控制学报,2012,39(10):45-58.
- [7] 陈思哲,章云,吴捷,等.不平衡电网电压下双馈风力发电系统的比例—积分—谐振并网控制[J].电网技术,2012,36(8):62-68.
- [8] 马宏伟,李永东,许烈.不对称电网电压下双馈风力发电机的控制方法[J].电力自动化设备,2013,33(7):12-18.
- [9] 李辉,杨顺昌,廖勇.并网型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):87-90.
- [10] 范立新,向张飏.双馈变速恒频风力发电机并网控制仿真研究[J].江苏电机工程,2012,31(6):39-42.

作者简介:

刘国华(1972),男,江苏南京人,高级工程师,从事发电机励磁和风电控制研究工作;

洪丹(1990),女,江西上饶人,助理工程师,从事风力发电控制技术工作;

王瑞(1988),女,河南郑州人,工程师,从事风力发电控制技术工作;

孙素娟(1983),女,山东济宁人,工程师,从事风力发电控制技术工作。

A Control Method for Rotor-Side Converter of DFIG under Unbalanced Grid Voltage Condition

LIU Guohua, HONG Dan, WANG Rui, SUN Sujuan
(NARI Group Corporation, Nanjing 211006, China)

Abstract: On the basis of the mathematical model for doubly-fed induction generator (DFIG) in positive and negative dual synchronously rotating frames under unbalanced grid-voltage, a control method for rotor-side converter is proposed, which chooses constant electromagnetic torque as the control target and uses proportional-integral-resonant (PIR) controller as the rotor current controller. Without PI controller in synchronously rotating frame and inner loop of rotor current, the control structure is simple and easy for practical use. Besides, the controllable range of unbalance has been analyzed. Simulation results verify the validity of theoretical analysis and the efficiency of rotor current PIR controller.

Key words: doubly-fed induction generator; unbalanced grid voltage; smooth electromagnetic torque; proportional-integral-resonant (PIR) controller

(上接第4页)

- 网压前馈问题分析[J].电工技术学报,2012,27(8):57-63.
- [9] 张建坡,赵成勇,敬华兵.比例谐振控制器在MMC-HVDC控制中的仿真研究[J].中国电机工程学报,2013,33(21):53-62.
- [10] 李子欣,李耀华,王平,等.PWM整流器在静止坐标系下的准直接功率控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9):47-54.
- [11] 刘钊,刘邦银,段善旭,等.链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J].中国电机工程学报,2009,29(30):7-12.

黄华(1984),男,江苏南通人,工程师,从事无功补偿相关技术研究工作;

周波达(1967),男,浙江舟山人,高级工程师,从事电力系统生产管理;

费建平(1962),男,浙江舟山人,工程师,从事电网运行管理工作;

陈亦汉(1962),男,陕西西安人,高级工程师,从事无功补偿相关技术研究工作;

刘磊(1984),男,陕西榆林人,工程师,从事无功补偿相关技术研究工作。

作者简介:

Design of Current Proportional-Resonant Controller for Chained STATCOM Basing on Root-Locus Method

HUANG Hua¹, ZHOU Boda², FEI Jianping², CHEN Chihan¹, LIU Lei¹
(1.Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Zhoushan Power Supply Company State Grid Zhejiang Electric Power Company, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Chained static synchronous compensator and its phase current control is a common method for the unbalanced problem of power grid and load. This paper proposes a method to employ proportion-resonance integration to trace phase current. Also, a design method for controller parameters selection using closed loop system's root locus, which can not only meet the stability requirement of current inner loop's closed loop system, but also have excellent dynamic performance is provided based on the mathematic model of STATCOM. Finally, PSCAD/EMTDC Simulation results verify the correctness of proportion-resonance integration controller's parameter selection method based on root locus method.

Key words: STATCOM; proportion-resonant; phase current control; root-locus method