

双馈风力发电机功角暂态行为及其控制策略

郝正航^{1,2}, 余贻鑫¹, 曾 沅¹

(1. 天津大学 电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 为研究电网扰动下双馈风力发电机(DFIG)暂态行为和抵御电网扰动的技术措施, 针对单机无穷大系统, 定义了 DFIG 功角并分析其暂态行为。由于 DFIG 的功角与转子位置无关, 其暂态行为是电磁暂态过程, 故具有快变特点。在电网故障扰动下, DFIG 的功角可能大幅变化, 通过相量图分析发现功角大幅变化是导致机端电压严重跌落和转子过载的主要原因。提出了在暂态过程中, 通过对备用坐标系和实时坐标系的切换操作, 实现对 DFIG 的功角控制。所提策略无需测量远方变量, 可使 DFIG 的功角剧变、电压跌落及转子过载问题得到较好解决。所提出 DFIG 功角控制策略还对风电场附近的同步电机有显著的致稳作用, 能减小大扰动下同步电机的首摆幅度。单机无穷大系统算例和多机系统算例证实了所提方法的优越性。

关键词: 风力发电; 双馈电机; 暂态稳定; 功角控制; 备用坐标系

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0079-05

0 引言

矢量控制下的双馈感应发电机(DFIG)具有可变速运行、高功率因数、电压波动小以及有功与无功可解耦调节诸多优点^[1], 从而在风力发电中得到广泛应用。但是, 随着单机容量和装机规模的迅速增长, 并网型 DFIG 的抗扰性问题令人担忧。在电网大扰动下, DFIG 的抗扰能力不仅远低于常规同步电机(SG), 而且还低于永磁直驱式风电机组^[2]。运行中发现, 即使远离风电场的电网故障也会造成风电场电压严重下跌^[3]。因此, 分析 DFIG 的动态行为和提高故障穿越能力是一个正在受到广泛关注的棘手问题。

DFIG 在电网扰动下, 其外部现象一般表现为“电网扰动 → 机端电压跌落 → 转子过电流”。为保护励磁变频器, 不允许持续的转子过电流, 故转子过电流的成因分析与防治措施一直是关注焦点^[4-13]。文献[4-7]认为电网故障期间, DFIG 定子磁链的直流和负序分量在转子侧产生很大的感应电动势, 引起转子电流过载。基于这种认识, 在转子电流控制中抵消定子磁链暂态分量, 成为一种普遍采用的措施^[4-6]。另外, 采用非线性控制策略^[8]、附加阻尼控制^[9]、附加电压调节^[10]、前馈补偿^[11], 以及改进转子电路拓扑结构^[12]等方案也能收到一定效果。另外, 在防治转子过电流的问题上, 以保护变频器为目的的各种撬棒(Crowbar)电路也是常用的技术措施^[13]。

以往研究侧重于“机端电压跌落 → 转子过电流”的因果分析, 而机端电压跌落产生的原因却少有关注。

故本文因果分析的重点是“电网扰动 → 机端电压跌落”, 这样有助于找到电网扰动下转子过载的根本原因, 有助于从源头上改善 DFIG 的抗扰性。文献[14]认为, 在大扰动下, DFIG 因大量吸收无功而造成机端电压下陷, 事实并非如此。本文从 DFIG 功角动态行为(剧变)的角度揭示了电压跌落机理, 进一步提出功角暂态控制方案, 使功角剧变、电压下陷和转子过载问题得到较好解决。

1 功角的定义

借鉴同步电机在单机无穷大系统中的功角概念, 将文献[15-16]的功角定义扩展为: DFIG 经输电线与远方大系统并列运行时(见图 1(a)), 其功角为内电势矢量 E 与无穷母线电压旋转矢量 U_s 的夹角 δ , 如图 1(b)所示。这里的坐标定向(q 轴)取发电机端电压矢量 U_g 。 E 滞后转子磁链 ψ_r 90° , $-\psi_r$ 与 d 轴夹角为 δ' , E 与 q 轴夹角也是 δ' , U_g 与 U_s 的夹角为

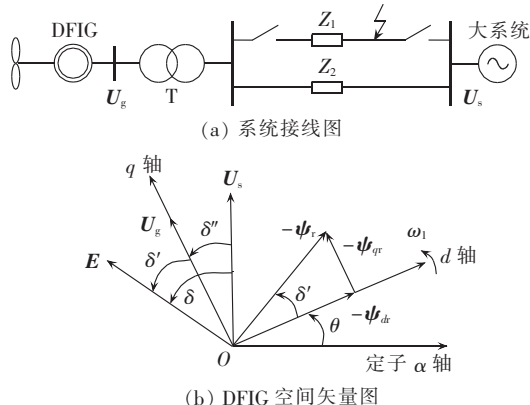


图 1 单机(DFIG)无穷大系统及其空间矢量图

Fig.1 Single-DFIG infinite system and vector diagram

收稿日期: 2010-04-26; 修回日期: 2010-05-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217904)

δ'' , 有 $\delta = \delta' + \delta''$ 。 θ 是 d 轴与静止 α 轴的夹角, 对 θ 的准确观测是坐标变换的关键。图 1 中系统的参数为: 对于 DFIG, $L_s = 15.86$ mH, $L_r = 16.2$ mH, $L_m = 15.66$ mH, $r_s = 0.008 \Omega$, $r_r = 0.0188 \Omega$; 网络参数 $x_T = j6.2 \Omega$, $Z_1 = Z_2 = (4 + j31.6) \Omega$ 。

2 DFIG 功角运动的实质和特点

对于并网型 DFIG, 人们关心的是它的抗扰性能否达到常规 SG 的水平或差距有多大。故本文把常规 SG 作为参照物。常规 SG 的功角动态行为由转子运动方程唯一决定, 本质上是牛顿力学问题, 转子的物理位置与功角严格对应。然而, DFIG 的功角运动与之截然不同, 为揭示二者异同, 考察 DFIG 的数学模型。

根据 DFIG 广义派克方程^[17], 按图 1(b) 坐标定向, 以定子磁链 (ψ_{ds}, ψ_{qs}) 和转子电流 (i_{dr}, i_{qr}) 为状态变量时, 状态方程表达为

$$p\psi_{ds} = -\frac{r_s}{L_s}\psi_{ds} + L''r_s i_{dr} + \omega_1 \psi_{qs} \quad (1)$$

$$p\psi_{qs} = -\frac{r_s}{L_s}\psi_{qs} + L''r_s i_{qr} - \omega_1 \psi_{ds} + u_{qs} \quad (2)$$

$$pL' i_{dr} = -r_r i_{dr} + u_{dr} + \omega_s L' i_{qr} + \omega_s L'' \psi_{qs} - L'' p\psi_{ds} \quad (3)$$

$$pL' i_{qr} = -r_r i_{qr} + u_{qr} - \omega_s L' i_{dr} - \omega_s L'' \psi_{ds} - L'' p\psi_{qs} \quad (4)$$

其中, $L' = L_r - L_m^2/L_s$, $L'' = L_m/L_s$, L_s , L_r 和 L_m 是定、转子自感和互感; r_s , r_r 是定、转子电阻; ω_1 和 ω_s 是同步转速和转差; u_{dr} , u_{qr} 是励磁电压; u_{qs} 是定子电压; p 是微分算子。

方程式(1)~(4)中没有 δ 或 δ' 。为了建立状态变量与功角的联系, 根据磁链方程, 将转子电流替换为定、转子磁链表达, 且认为定子磁链近似恒定而忽略其微分项, 则方程(3)(4)转化为

$$pL' L_s \psi_{dr} = -L_s r_r \psi_{dr} + L_m r_r \psi_{ds} - L_2 u_{dr}^* \quad (5)$$

$$pL' L_s \psi_{qr} = -L_s r_r \psi_{qr} + L_m r_r \psi_{qs} - L_2 u_{qr}^* \quad (6)$$

其中, $L_2 = L_r^2 - L_s L_r$, u_{dr}^* , u_{qr}^* 是引入前馈补偿后代替 u_{dr} , u_{qr} 的新控制量。由图 1(b) 知, ψ_{dr} , ψ_{qr} 和 δ' 有三角函数关系。从式(5)(6)可得出以下结论:

a. 由于在 ψ_{dr} 和 ψ_{qr} 的动态方程中消去了 ω_s , 导致它们与机械量完全解耦, δ' 和 δ 也因此与机械量解耦;

b. ψ_{dr} 和 ψ_{qr} 在 u_{dr}^* 和 u_{qr}^* 控制作用(或故障扰动)下, 响应很快, 时间常数 ($\tau = L'/r_r$) 约为数十毫秒。

综上, 功角 δ 的变化与转子机械运动无关, 是纯粹的电磁暂态过程, 时间常数很小, 变化很快, 这种特点与常规 SG 有本质区别。

下面通过仿真考察 DFIG 功角响应特点。基于图 1(a) 系统, 设置如下故障: $t = 0.77$ s 时一回线路末端发生三相瞬时短路, $t = 0.8$ s 故障线路开断, $t = 1.3$ s 重合成功。在如上扰动下, 相同容量、相同出力条件下的 DFIG 和常规 SG 的功角响应如图 2 所示。常规 SG 的功角首摆从稳态时的 45° 升到 66° ; 而 DFIG 从

45° 上升到 148° 。可见, DFIG 功角运动的特点是“变化快、幅度大”。

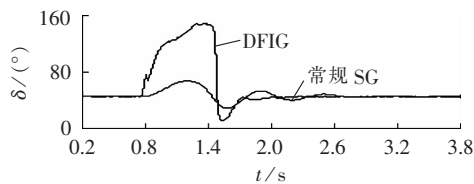


图 2 DFIG 与常规同步电机功角响应比较

Fig.2 Comparison of power angle response between DFIG and conventional generator

3 功角大幅变化引起的电压跌落机理

根据空间矢量和时间相量的关系, 图 1 中的 E_g 和 U_s 改用相量表示(见图 3)。其中 x_g ($x_g = \omega_1 L'$)、 x_e 和 I 分别是内电抗、外部电抗和定子电流, 各相量的下标“0”表示故障前; 下标“1”表示故障后。在故障前, 由于功角 δ_0 较小, 机端电压 U_{g0} 和定子电流 I_0 维持在额定值附近。故障后, 功角大幅增至 δ_1 , 定子电流增加为 I_1 , 机端电压降至 U_{g1} 。由图可见, 由于 δ_1 很大, 导致 U_{g1} 远小于 U_{g0} , 说明功角大幅增加将造成端电压严重下降。

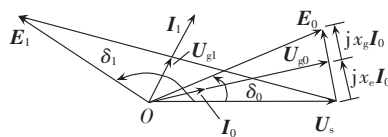


图 3 功角增大对机端电压的影响

Fig.3 Influence of angle increase on terminal voltage

综合第 2 节和本节分析可见, 电网故障后, DFIG 功角发生剧变, 在网络方程约束下致使机端电压跌落。简单言之, 电网故障激发了 DFIG 动态, 功角的快动态“放大”了故障后果。

图 4 是前述故障下的 DFIG 与常规 SG 的电压响应对比。SG 由于功角摆幅较小, 端电压由故障前的 690 V 仅下降至 639 V; 而 DFIG 由于功角变化大, 导致电压由 690 V 跌落至 220 V。可见, 功角变化决定了电压变化。而且, 低电压还将进一步导致转子变流器过载^[4-6]。因此, 提高 DFIG 抗扰能力的源头是功角控制。

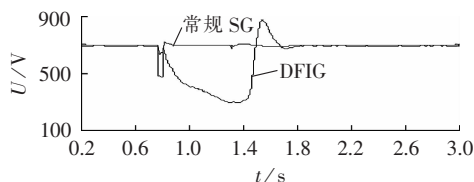


图 4 DFIG 与常规同步电机端电压响应比较

Fig.4 Comparison of terminal voltage response between DFIG and conventional generator

4 DFIG 的暂态功角控制策略

由第 3 节的分析可知, DFIG 在电网大扰动下, 电压跌落是由功角大幅变化所致。功角大范围变化

的原因在于:常规的功率、电流双闭环控制着眼于有功、无功的解耦调节,缺少功角控制机制^[1]。本文拟解决在电网故障期间对 δ 实施有效控制的问题。这一问题的难点在于:当采用反馈控制时,必须能够实时测量被控量 δ ,而测量 δ 需测量远方母线电压矢量 U_s (见图 1),这是相当困难的。文献[15-16]曾提出一种控制 δ' 的方案。由图 1(b)看出,以控制 δ' 代替控制 δ ,只有在 δ'' 恒定不变的前提下才能实现,文献[15-16]没有考虑到这一点,造成控制效果不明显。据图 1(b),欲使 δ'' 不变,需使 U_g 转速不变。而电网故障期间 U_g 无法保证恒速,其变化情况如图 5 所示。

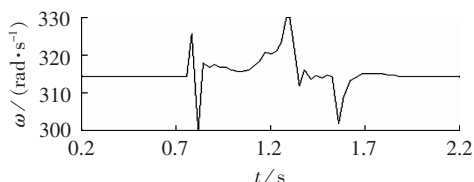


图 5 故障期间 DFIG 定向坐标轴的转速
Fig.5 Rotational speed of DFIG reference frame during fault

由图 5 可见,在暂态过程中(0.77~1.6 s), U_g (q 轴)转速发生了剧烈变化, δ'' 也必有大幅变化。为解决这个问题,本文提出在故障期间, q 轴的定向矢量不采用基于实时观测的 U_g ,而采用一种备用坐标系,可保证故障期间 δ'' 基本为恒值。这样就能通过控制 δ' 达到间接控制 δ 的目的,而控制 δ' 无需测量远方变量,容易实现。

4.1 DFIG 的实时坐标系和备用坐标系

对于 DFIG 常规矢量控制,无论 q 轴取用定子磁链还是定子电压,都是通过对电机磁链或电压的瞬时值实时观测而形成旋转坐标轴的,即实时坐标系。正常工况下,实时坐标系是同步转速。本文提出的备用坐标系只用于故障期间,它能保持故障前的同步转速,故障恢复后再切换到实时坐标系。

坐标系建立的前提是对 θ (见图 1(b))的准确观测,进一步形成 $\sin \theta$ 和 $\cos \theta$ 用于坐标变换。实时坐标系与备用坐标系的关系如图 6 所示。常规控制中只有实时坐标系,它的输出 θ 通过对机端三相电压 u_a, u_b, u_c 经过 $3/2$ 变换和旋转变换后得到。设 $\theta = \omega_1 t + \theta_0$,由于在正常工况下 ω_1 也是变化的,故对实时坐标系的 θ 和 ω_1 进行跟踪保持,得到备用坐标系的输出 θ_0 。在无故障情形下, $\theta_0 = \theta$; 当发生大扰动时,故障状态甄别器能快速判断大扰动发生,立即记录故

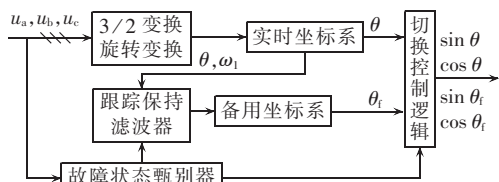


图 6 实时坐标系与备用坐标系

Fig.6 Real-time frame and standby reference frame

障时刻 t_f ,并发出指令,跟踪保持滤波器能够锁定实时坐标系在 $t=t_f$ 时的输出 ω_1 和 θ_{f0} ,故障后, $\theta_0 = \omega_1(t - t_f) + \theta_{f0}$, θ_0 用于暂态过程中的坐标变换。

4.2 附加功角控制策略

建立了备用坐标系后,可实现 DFIG 的功角控制。在常规功率-电流双闭环控制的基础上,提出附加功角控制策略,如图 7 所示。虚线框内是附加控制部分。由图 1(b)中 δ' 与转子磁链 d, q 分量(ψ_{dr} 和 ψ_{qr})的关系,提出如下控制原理:根据 δ' 和有功的参考值(δ'_{ref} 和 P_{ref}),计算出转子磁链分量指令值 ψ_{qr}^* 和 ψ_{dr}^* ,通过反馈 ψ_{qr} 和 ψ_{dr} 形成偏差量,经 PI 调节器得到对 i_{qr} 和 i_{dr} 的附加控制量。在电网大扰动期间,由于备用坐标系保证了坐标轴转速不变,控制 δ' 等效于控制 δ ,使得 DFIG 的功角抗扰动能力大幅度增强,同时电压跌落问题得到解决。

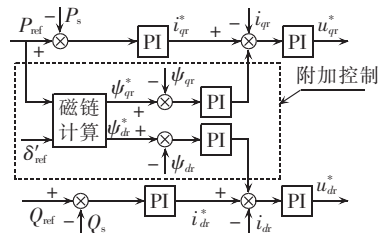


图 7 附加功角控制策略

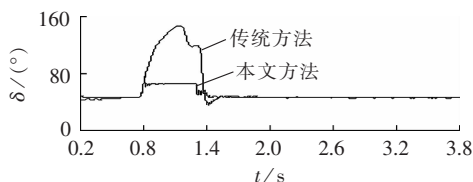
Fig.7 Control strategy of appended power angle

5 算例分析

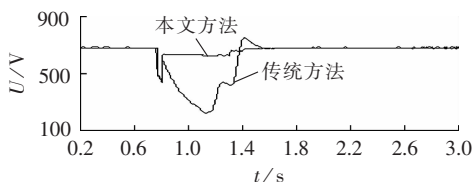
以 Matlab/Simulink 的 Power System Block 为工具,建立 DFIG 及其控制系统的仿真模型。所建模型包括了功率-电流双闭环控制策略、磁链观测和定子电压定向矢量控制。其中,励磁功率单元使用三相六脉冲逆变器,并采用正弦脉宽调制(SPWM)技术,调制频率为 6 kHz。

5.1 单机(DFIG)对无穷大系统情形

仍然使用图 1 系统,运行条件和故障设置同第 2 节所述,现验证本文控制策略的效果。图 8(a)是分别采用常规方法和本文方法得到的暂态功角响应。常规方法控制时,DFIG 功角最大升至 148°;采用本文方法时,功角最大仅达到 66°;可见,应用本文方法,功角变化幅度远小于常规控制,其功角抗扰性已接近相同容量 SG(参见图 2)。图 8(b)是基于 2 种方法的电压控制效果,使用本文方法时,机端电压由 700 V 下降至 460 V(仅持续 0.03 s);而常规控制时跌落至 220 V,且低电压持续时间很长。因此,采用本文的功角控制策略,DFIG 的抗扰能力可以达到或接



(a) 功角暂态响应



(b) 电压暂态响应

图 8 本文方法与传统方法控制效果的对比

Fig.8 Comparison of control effect between proposed and traditional control strategies

近 SG。图 9 是分别使用传统控制策略和本文方法时转子电流波形。以传统方法控制时,故障造成了 2.3 倍的转子过电流(设 Crowbar 未启动);采用文中控制方法时,转子过电流仅为 1.15 倍,显示了该方法在提高功角稳定的同时,有效抑制了励磁变频器的过电流,可避免触发 Crowbar 动作,有利于系统整体稳定性。

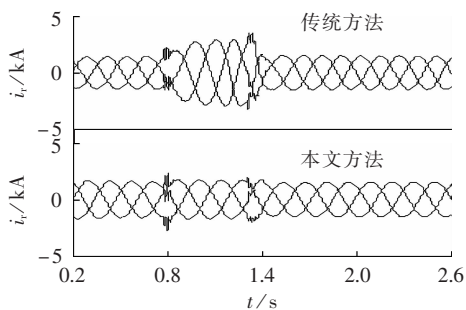


图 9 基于 2 种方法的转子电流暂态响应

Fig.9 Transient rotator current response of two strategies

5.2 DFIG 与同步电机并列情形

图 10 是双馈风电场与常规电站“打捆”输电的简化网络(能代表一类典型问题),其中 G_1 和 G_2 是常规 SG。现考察当 DFIG 采用附加功角控制时,对临近 SG 暂态稳定性的影响。

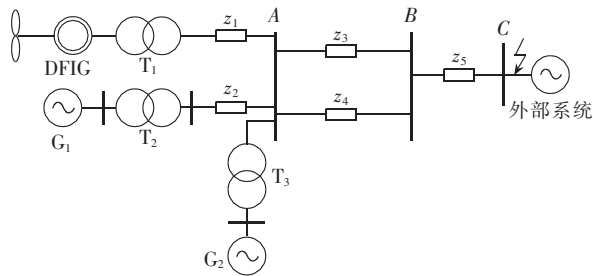


图 10 接入 DFIG 风电场的输电系统

Fig.10 Power transmission system with DFIG-based wind farm

图 10 系统的参数(除时间常数外其他数值取标幺值)为:对于 DFIG, $L_s=12.46$, $L_r=12.73$, $L_m=12.3$, $r_s=0.02$, $r_r=0.047$;对于 G_1 和 G_2 , $x_d=0.51$, $x'_d=0.042$, $x''_d=0.032$, $x_q=0.375$, $x'_q=0.0106$, $\tau'_d=0.33$ s, $\tau''_d=0.03$ s, $\tau'_q=0.03$ s, $H_1=6.98$ s(G_1), $H_2=3.49$ s(G_2);网络参数 $x_T=j0.15$, $z_1=0.003+j0.025$, $z_2=0.006+j0.05$, $z_3=z_4=0.1+j0.75$, $z_5=0.0025+j0.025$ 。

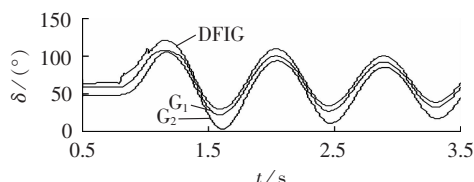
首先做简要理论分析:设外部系统为无穷大系统,则图 10 所示系统的暂态失稳模式表现为 G_1 和 G_2 对外部系统的失步。当输电网络或外部系统故障时, G_1 和 G_2 属同调机组,故只考察其中一台(G_1)。 G_1 的电磁功率表达式为^[18]

$$P = \frac{EU_A}{x} \sin \delta_{EA} = \frac{EU_A}{x} \sin(\delta_E - \delta_A) \quad (7)$$

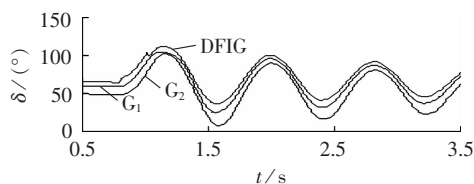
其中, E 和 δ_E 分别是 G_1 的内电势和功角; U_A 和 δ_A 分别是母线 A 的电压和相位。

根据第 5.1 节的仿真分析可知,对 DFIG 采用本文所提的功角控制策略后,可大幅度限制 DFIG 功角和电压变化,即相当于抑制了 U_A 的跌落和 δ_A 的增加。根据式(7)可以推断,这种控制作用使故障期间 G_1 的电磁功率降幅减小,即“加速面积”减小,从而可提高 G_1 (和 G_2)的暂态稳定性。

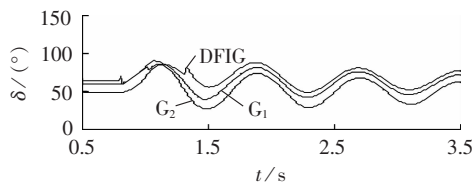
设 $t=0.8$ s 时,因外部故障造成母线 C 电压跌落至 0.5 p.u.,故障持续 0.22 s。当 DFIG 分别使用 3 种励磁控制策略时,各发电机功角暂态响应如图 11 所示。传统方法控制下,DFIG、 G_1 和 G_2 故障后功角最大值分别为 121° 、 107° 和 105° ;采用文献[15-16]方法时,各功角变化最大值分别为 111° 、 103° 和 101° ;当采用本文方法后,各功角最大达到 87° 、 89° 和 83° 。可见,本文提出的 DFIG 功角控制策略不仅改善其自身功角稳定性,而且对临近 SG 也产生了明显的致稳作用,提高了输电系统的整体抗扰能力。



(a) 传统方法



(b) 文献[15-16]方法



(c) 本文方法

图 11 基于 3 种方法的各发电机功角暂态响应

Fig.11 Transient power angle response of three strategies

6 结论

通过本文的研究有 3 个主要的成果和结论。

a. 在单机无穷大系统中,DFIG 功角动态完全由电磁暂态过程决定。在常规 dq 解耦控制下,电网扰

动可使功角快速大幅变化,导致机端电压跌落和转子电流过载,故抵御电网故障的能力差。

b. 基于备用坐标系的功角控制策略能够大幅度提高DFIG的功角和电压暂态稳定性,由于抑制了机端电压跌落,转子过流问题得到较好解决。

c. 对DFIG功角的有效控制,将有利于并列运行的SG的暂态稳定性。

参考文献:

- [1] DATTA R, RANGANATHAN V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine—a comparison with alternative schemes[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17(3): 414-421.
- [2] HANSENA A D, MICHALKE G. Fault ride-through capability of DFIG wind turbines[J]. Renewable Energy, 2007(32): 1594-1610.
- [3] MORREN J, SJOERD W H. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [4] XIANG Dawei, LI Ran. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [5] LOPEZ J, SANCHIS P, ROBOAM X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [6] LOPEZ J, GUBIA E, OLEA E, et al. Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4246-4253.
- [7] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85-91.
YANG Shuying, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Electro-magnetic transition of doubly fed wind turbines initiated by voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 85-91.
- [8] RAHIMI M, PARNIANI M. Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators [J]. Electric Power Systems Research, 2010(80): 184-195.
- [9] MISHRA Y, MISHRA S, TRIPATHY M. Improving stability of a DFIG-based wind power system with tuned damping controller [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 650-659.
- [10] ERLICH I, KRETSCHMANN J, FORTMANN J. Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 909-919.
- [11] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
HU Jiabing, SUN Dan, HE Yikang, et al. Modeling and control of DFIG wind energy generation system under grid voltage dip [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 21-26.
- [12] FLANNERY P S, VENKATARAMANAN G. A fault tolerant doubly fed induction generator wind turbine using a parallel grid side rectifier and series grid side converter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(3): 1126-1135.
- [13] EL-SATTAR A A, SAAD N H, SHAMS EL-DEIN M Z. Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(2): 1240-1246.
- [14] ELKINGTON K, VALERIJS K V, GHANDHARI M. On the stability of power systems containing doubly fed induction generator-based generation [J]. Electric Power Systems Research, 2008(78): 1477-1484.
- [15] ANAYA-LARA O, HUGHES F M. Rotor flux magnitude and angle control strategy for doubly fed induction generators [J]. Wind Energy, 2006(9): 479-495.
- [16] ANAYA-LARA O, HUGHES F M, JENKINS N. Control of DFIG -based wind generation for power network support [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1958-1966.
- [17] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 383-397.
- [18] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统的安全性和稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

(编辑: 康鲁豫)

作者简介:

郝正航(1972-), 男, 河南杞县人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定和风力发电 (E-mail: haozhenghang@163.com);

余贻鑫(1936-), 男, 北京人, 中国工程院院士, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统安全性与稳定性、智能电网和风力发电等领域的研究。

Transient performance of DFIG power angle in wind farm and its control strategy

HAO Zhenghang^{1,2}, YU Yixin¹, ZENG Yuan¹

(1. Key Laboratory Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: For studying the transient performance of DFIG (Doubly Fed Induction Generator) of under grid disturbance and developing the technical countermeasures, the power angle of DFIG is defined and its dynamic behavior is analyzed for a single-machine infinite system. As the power angle is independent of the rotor position and its transient behavior is an electromagnetic process, it varies quickly and greatly during grid disturbances. The analysis of vector chart demonstrates that the great variation of power angle causes the deep drop of terminal voltage and the overload of rotor. It is proposed to realize the real-time control of the power angle during the transient process by the switchover between the real-time frame and the standby reference frame to solve the problems mentioned above. The proposed angle control strategy can also restricts the first swing of the synchronous generators nearby the wind farm during grid disturbances. Simulations for single-machine infinite system and multi-machine system verify its superiority.

This work is supported by Special Fund of the National Fundamental Research of China (2004CB217904).

Key words: wind generation; doubly fed induction generator; transient stability; power angle control; standby reference frame