

文章编号:1000-582X(2011)11-077-10

不对称电网故障下双馈风电机组 低电压穿越方案比较研究

李 辉, 廖 勇, 姚 骏, 刘 刃

(重庆大学 配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:相比于对称电网故障, 不对称电网故障在实际电力系统运行中发生的概率更大, 其对双馈风电机组(DFIG)的“有害”影响也更大。首先分析了不对称电网故障下双馈风电机组的瞬态特性, 继而结合仿真, 研究了双馈风电机组各种低电压穿越(LVRT)技术方案在严重不对称电网故障下的运行特性。在此基础上, 对不同的低电压穿越方案进行了深入分析研究, 阐述了其运行特点, 并进一步探讨了各种低电压穿越方案的经济性, 为工程实现各种低电压穿越方案奠定基础。

关键词:风力发电; 风力机; 严重不对称电网故障; 低电压穿越; 双馈感应发电机; 串联网侧变

中图分类号: TM614; TM761

文献标志码: A

Comparative study of low voltage ride-through techniques for doubly-fed induction generator wind turbines under asymmetrical grid faults

LI Hui, LIAO Yong, YAO Jun, LIU Ren

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Asymmetrical grid faults occur more frequently and have more adverse effects on the doubly fed induction generator (DFIG) than symmetrical grid faults in the transmission system. The transient response of DFIG under asymmetrical grid faults is analyzed firstly. Meanwhile, operation behaviors of several low voltage ride-through (LVRT) techniques under severe asymmetrical grid faults are given by simulation with the Matlab/Simulink software. Then the characteristics of these LVRT techniques are further researched and analyzed based on the simulation results. Finally, the economies of these LVRT techniques are discussed. The conclusion lays a certain foundation for engineering development of these LVRT techniques.

Key words: wind power; wind turbines; severe asymmetrical grid fault; low voltage ride-through (LVRT); doubly fed induction generator (DFIG); series grid-side converter (SGSC)

收稿日期: 2011-06-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA05Z422); 重庆市科技计划攻关资助项目(CSTC 2008AB3047)

作者简介: 李 辉(1983-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事新型电机及其控制的研究。

廖 勇(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) yongliao@cqu@vip.sina.com。

双馈风电机组 (DFIG) 以其可变速恒频运行、有功和无功功率独立可调及励磁变流器容量小 (仅占系统容量的 30% 左右) 等优点, 已成为 MW 级并网风力发电机组的主流机型。近年来, 随着以 DFIG 风电机组为主干的大型并网风电场装机容量不断提升, 使得该类发电机组与电网的相互影响变得越来越大。为保证电力系统的安全、可靠运行, 世界各地电网公司及电网运营商纷纷修改其电网规程, 要求并网风电机组需像常规能源一样在电网故障期间亦能对电网提供有效支持, 即要求并网风电机组具备低电压穿越 (LVRT) 甚至是零电压穿越 (ZVRT) 能力^[1-2], 这就对并网运行的风电机组提出了最严峻的考验。

而双馈风电机组定子侧与电网直接相连的结构特性决定了其对电网扰动尤其是电网故障异常敏感。若故障期间未采取有效措施, 极易危及 DFIG 机组的安全运行。因此, 如何进一步提高 DFIG 机组在电网故障下的 LVRT 能力以满足日益严格的电网规程要求, 已成为当前研究的热点问题。国内外学者从不同角度出发, 采用各种方法以期提高 DFIG 机组的 LVRT 能力。如文献[3-7]提出在电网故障时切除发电机励磁电源, 利用转子旁路保护电阻释放能量以减小转子过电流, 保护转子励磁回路的功率电子器件; 文献[8]考虑了发电机的精确数学模型, 提出了计及定子励磁电流动态过程的改进励磁控制策略; 文献[9-10]则在导出的发电机基本电磁关系的基础上, 分析了电网故障时发电机的暂态物理过程, 通过控制发电机漏磁链以抵消定子磁链中的暂态直流分流及负序分量对转子侧的影响, 同时, 利用定子侧电阻对发电机进行灭磁, 从而实现故障时避免转子出现过电流的目的; 文献[11]则指出定子电压骤降时在定子磁链中引起的直流分量、负序分量和定子电流中可能较大的正序分量是可能造成转子过电流的重要原因。改进的控制方案从限制电网故障时转子工频过电流的角度出发, 有效限制了由定子电流工频分量引起的转子电流交流分量, 同时, 对定子磁链中的直流分量利用发电机定子电阻对其灭磁, 从而实现故障时避免转子出现过电流的目的; 文献[12-14]基于动态电压恢复器的思想, 提出在定子侧串联网侧变换器来有效阻止由于电压骤降引起的磁链振荡, 进而防止转子侧过电流和过电压的出现, 保护功率模块, 从而实现 LVRT; 文献[15]提出在 DFIG 定子和电网之间装设由反并联晶闸管构成的电子开关。在电网故障时, 通过控制电子开关, 断开 DFIG 与电网的连接, 保护机组的安全。故障切除后, 又通过电子开关将机组迅速投入电网。此外, 为有效保护直流母线电容, 文献[16-17]提出在电网电压跌落时, 将过剩的能量通过与直

流母线直接耦合的一个双向 DC/DC 变换器存储在电池或者超级电容器构成的储能装置中, 有效稳定直流母线电压。

但值得注意的是, 目前的研究和报道, 尤其是目前应用较多的 Crowbar 保护及其改进方案多集中于电网对称故障情况下 DFIG 机组 LVRT 能力的提高^[3-7]。然而在实际运行中, 不对称电网故障发生的几率更大, 且当不对称电网故障发生时, 由于电网电压负序分量的存在, 其对 DFIG 机组产生的“有害”影响更大。因此, 研究和分析 DFIG 机组各种 LVRT 技术在电网不对称故障情况下的性能更具实际应用价值。近年来虽然已有不少学者采用改进励磁控制算法, 如基于暂态磁链补偿控制的改进励磁控制策略^[9-11], 基于正、负序分量分离的双电流比例积分 (PI) 调节控制技术^[18-20], 比例积分谐振控制器^[21], 改进的直接功率控制技术^[22-24], 非线性控制策略^[25]等, 针对 DFIG 风电机组在不对称电网故障下的运行及控制展开了相关研究并有效增强了 DFIG 风电机组在电网发生不对称短路故障时的不脱网运行性能。但其所研究情况中由不对称故障引起的负序分量所占比例并不大 (负序分量所占比重一般不超过 20%)。当电网发生两相相间及两相对地等严重不对称短路故障时, 各种 LVRT 技术方案的性能如何, 现有文献鲜有这方面的对比分析及研究。

笔者首先分析了电网发生不对称短路故障时, DFIG 机组的瞬态特性, 继而结合仿真, 研究了 DFIG 机组各种 LVRT 技术方案在严重不对称电网故障下的运行特性, 在此基础上, 对不同的 LVRT 方案进行了深入分析研究, 阐述了它们的运行特点, 最后探讨各种 LVRT 方案的经济性。

1 不对称电网故障下 DFIG 机组瞬态特性

采用电动机惯例, DFIG 机组在定子参考轴系下的电压和磁链方程可表示为 (折算至定子侧)^[26]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_s &= R_s \mathbf{i}_s + p \boldsymbol{\psi}_s \\ \mathbf{u}_r &= R_r \mathbf{i}_r + p \boldsymbol{\psi}_r - j \omega_r \boldsymbol{\psi}_r \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_s &= L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \\ \boldsymbol{\psi}_r &= L_r \mathbf{i}_r + L_m \mathbf{i}_s \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_r$ 为定、转子电压空间矢量; $\mathbf{i}_s, \mathbf{i}_r$ 为定、转子电流空间矢量; $\boldsymbol{\psi}_s, \boldsymbol{\psi}_r$ 为定、转子磁链空间矢量; L_m 为定、转子互感; $L_s = L_m + L_{s\sigma}, L_r = L_m + L_{r\sigma}$ 为定、转子全自感; R_s, R_r 为定、转子电阻; ω_r 为转子电角频率; p 为微分算子。

将式(2)带入式(1), 整理可得转子电压空间矢量表达式为:

$$\mathbf{u}_r = \left(\frac{L_m}{L_s} \right) (p - j \omega_r) \boldsymbol{\psi}_s +$$

$$\left[R_r + L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) (p - j\omega_r) \right] i_r. \quad (3)$$

式(3)中第一项表示定子磁链在 DFIG 转子侧感生的电势。当电网发生不对称短路故障引起风电场母线电压骤降时,因 DFIG 定子直接与电网相连,电网电压的突变将直接传递至 DFIG 机端,使 DFIG 定子电压发生突变,进而导致发电机定子磁链中出现暂态直流分量及负序分量。故障后发电机定子磁链各分量与定子电压各分量之间的关系为^[4]:

$$\begin{aligned} \psi'_s &= \psi'_{sDC} + \psi'_{sP} + \psi'_{sN} \\ &= \left(\frac{U_s}{j\omega} - \frac{U'_{sP}}{j\omega} - \frac{U'_{sN}}{-j\omega} \right) e^{-t/\tau_s} + \frac{U'_{sP}}{j\omega} + \frac{U'_{sN}}{-j\omega}. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ψ'_s 为故障后发电机定子磁链空间矢量; ψ'_{sDC} 为故障后发电机定子磁链暂态直流分量的空间矢量; ψ'_{sP} 和 ψ'_{sN} 分别为故障后发电机定子磁链正、负序分量的空间矢量; U_s 为故障前瞬间发电机定子电压空间矢量; U'_{sP} 和 U'_{sN} 分别为故障后瞬间发电机定子电压正、负序分量的空间矢量; ω 为定子电角频率; τ_s 为发电机定子磁链暂态直流分量的衰减时间常数; U'_{sP} 和 U'_{sN} 分别为故障后发电机定子电压正、负序分量的空间矢量。

在转子参考轴系下,当转子绕组切割定子磁场时,DFIG 定子磁场各序分量将在转子绕组中感生相应的电势:

$$\begin{aligned} u'_{rP} &= |U'_{sP}| \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot s \cdot e^{js\omega t}, \\ u'_{rN} &= |U'_{sN}| \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot (2-s) \cdot e^{-j(2-s)\omega t}, \\ u'_{rDC} &= -j\omega_r \frac{L_m}{L_s} \cdot \left(\frac{U_s}{j\omega} - \frac{U'_{sP}}{j\omega} - \frac{U'_{sN}}{-j\omega} \right) \cdot e^{-t/\tau_s} \cdot e^{-j\omega_r t}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: u'_{rP} 、 u'_{rN} 及 u'_{rDC} 分别为 DFIG 定子磁场正序分量、负序分量以及暂态直流分量在转子侧所感生的

电势; s 为转差率。

由式(5)可知,DFIG 定子磁场负序分量及暂态直流分量由于其相对转子速度较大,均将在转子绕组中感生出较大幅值的电势。从电路的角度考虑,由于定、转子漏感及电机负序阻抗一般很小且转子侧变换器励磁容量有限,无法在故障过程中提供足够大的电压抵消这些感生电势,DFIG 转子侧将出现过电压及过电流危及转子侧变换器的安全运行。此外,由式(3)及式(5)可知,故障过程中,DFIG 定、转子磁场各序分量亦将在定、转子绕组中产生相应的定、转子电流。大幅波动的定、转子电流亦将引起 DFIG 电磁转矩的大幅振荡,对风机传动轴系特别是齿轮箱产生严重冲击,增加其疲劳程度,甚至导致齿轮箱损坏。同时,由于电网电压的降低导致网侧变换器对直流母线电压的控制能力大幅减弱,无法及时将 DFIG 机组转子侧过剩的能量输送至电网,将导致直流母线电压泵升,危及直流母线电容的安全。

图 1 给出了电网在公共连接点(PCC 节点)发生 150 ms 两相相间短路故障,DFIG 机组采用传统的基于定子磁场定向矢量控制算法时发电机机端电压、转子电流、电磁转矩及直流母线电压波形,进一步验证了前述分析。假设故障过程中发电机转速基本保持不变,故障前发电机以最高转速 1 950 r/min ($s = -0.3$) 按功率因数 1 满载稳定运行。由图 1 可知,当电网发生严重三相不对称短路故障时,DFIG 机组转子侧在整个故障过程中出现持续过电流,系统电磁转矩持续大幅振荡,直流母线电压快速泵生。这就要求 DFIG 系统在整个故障过程中均须采取有效措施抑制转子侧过电流、直流母线过电压及电磁转矩的剧烈振荡,确保转子侧变换器、直流母线电容及风机传动轴系特别是齿轮箱的安全运行。

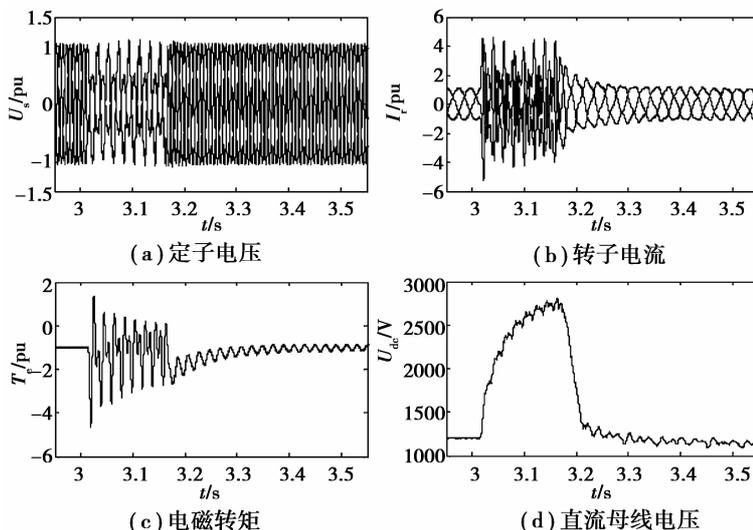


图 1 两相相间短路故障时 DFIG 机组仿真结果

2 不对称电网故障下 DFIG 机组各种 LVRT 技术方案分析

2.1 转子短路保护技术方案

转子短路保护技术 (Crowbar Protection) 方案^[3-7]是目前应用较多的一种实现双馈风电机组 LVRT 的技术方案,其基本原理是在电网故障期间通过一定阻值的电阻短接转子绕组,为转子侧过电流提供一条旁路通道,从而有效保护转子侧变换器。随着电网规程的日益严格,Crowbar 保护电路越来越多的采用二极管整流桥加 GTO 或 IGBT 等可自关断器件的拓扑结构(active Crowbar)^[5,7],如图 2 所示。采用该拓扑结构,当电网故障电流衰减至变流器可承受的最大电流值以下时,可利用 GTO 或 IGBT 迅速切断 Crowbar 电路,使转子侧变换器重新投入运行,对电网提供有效支持^[5,7]。

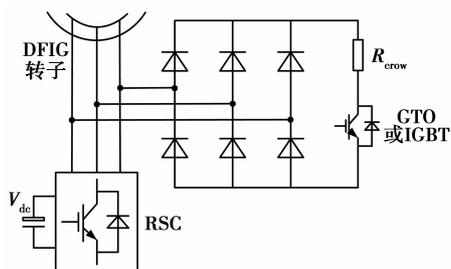


图 2 双馈风电机组 active Crowbar 结构

Crowbar 电阻的阻值对 LVRT 效果有很大影响。为有效实现发电机的保护控制,应合理选取保护电阻的阻值,保护电阻的阻值太小将无法有效限制最大电流,阻值太大则可能引起转子过电压,损坏转子绕组^[3-4]。通常认为三相对称短路故障对系统的危害最大。对于非对称短路故障,虽然其严重程度低于三相对称短路故障,适当增大 Crowbar 电阻值可以有效抑制电磁转矩及瞬态电流峰值,但 Crowbar 电阻值应根据 DFIG 机组最恶劣的运行工况确定。同时,Crowbar 电阻值一旦确定,无论电网发生何种故障均应以此电阻值进行投切。德国 E. on Netz 公司要求风电机组在风电场母线电压骤降为零时仍能继续并网运行且不断网持续时间至少为 150 ms,这就对并网运行的风电机组提出了最严峻的考验。本节将首先针对 active Crowbar 结构,参照德国 E. on Netz 公司 LVRT 要求给出 Crowbar 电阻的确定原则,然后再结合仿真,分析在严重不对称电网故障下,DFIG 机组采用转子短路保护技术时的运行特性。

当采用图 2 所示的 active Crowbar 结构时,双馈电机转子侧的等效模型如图 3 所示(图中各物理量均折算至定子侧)。由图 3 不难得出以下关系式:

$$u_r = U'_{rmax} - (Z_{or} + R_r)i_{rmax}, \quad (6)$$

$$u_d \approx \frac{2.34u_r}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

$$i_{rmax} \approx \sqrt{2} \times 0.816i_d, \quad (8)$$

$$R_{crow} = \frac{u_d}{i_d}, \quad (9)$$

式中: U'_{rmax} 、 i_{rmax} 分别为 DFIG 定子磁场在转子侧感生电势及转子绕组电流的最大峰值; u_d 、 i_d 为三相二极管整流桥直流侧电压及电流; Z_{or} 为故障时转子侧等效电抗; u_r 三相二极管整流桥交流侧相电压峰值。

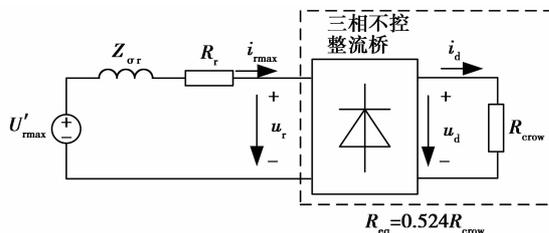


图 3 采用 active Crowbar 时双馈电机转子侧的等效模型

由式(6)-(9),三相不控整流桥及 Crowbar 电阻 R_{crow} 可以等效为一个电阻 R_{eq} :

$$R_{eq} = \frac{u_r}{i_{rmax}} = \frac{\sqrt{2}u_d/2.34}{\sqrt{2} \times 0.816i_d} \approx 0.524R_{crow}。 \quad (10)$$

由图 3 所示电路关系及结合式(6)-(10),在电网故障时的转子绕组中的最大电流可表示为:

$$i_{rmax} = \frac{U'_{rmax}}{\sqrt{(Z_{or})^2 + (0.524R_{crow} + R_r)^2}}。 \quad (11)$$

当电网故障且 Crowbar 投入时,若转子线电压不超过直流母线电压,故障转子电流将完全流经 Crowbar 电阻。虽然考虑到机组短时承受过压、过流能力较强,但也应将最大故障转子电流限制在一定范围内,以限制故障时的瞬态电磁转矩对机组转轴系统的冲击。另外,较大的故障电流必然要求较大的 IGBT 的电流容量,增大系统的成本。因此,应将最大故障电流限制在一定范围之内,即

$$i_{rmax} = \frac{U'_{rmax}}{\sqrt{(Z_{or})^2 + (0.524R_{crow} + R_r)^2}} \leq i_{safe}。 \quad (12)$$

但较大的 Crowbar 电阻必然产生较大的转子绕组电压。当转子线电压的峰值大于直流母线电压值 U_{dc} 时,转子电流将经转子侧变换器对直流母线电容充电,有可能损坏直流母线电容^[2,7]。在实际中,为防止 Crowbar 电阻值较大造成转子侧过压及对直流母线电容反充电,则需满足:

$$\frac{\sqrt{3} \times 0.524R_{crow} \times U'_{rmax}}{\sqrt{(Z_{or})^2 + (0.524R_{crow} + R_r)^2}} \leq \frac{U_{dc}}{V_{base}} \cdot K_t, \quad (13)$$

式中： K_t 为发电机定、转子变比； U_{dc} 为直流母线电压实际值； V_{base} 为电压基值。

因此，Crowbar 电阻值的选取要同时满足式 (12) 及式 (13)。在设计中，若无法同时满足，应优先考虑满足式 (13)，以便网侧变换器在故障过程中按无功优先原则，向电网输出一定无功功率。由式 (13) 可以确定 Crowbar 电阻的最大值，即转子短路故障电流的最小值。

以一台 2MW DFIG 机组为例，主要参数如下： $K_t=0.45$ ； $L_{\sigma s}=0.1386$ pu； $R_r=0.00549$ pu； $L_{\sigma r}=0.1493$ pu； $L_m=3.9527$ pu； $U_{dc}=1200$ V；电压基值 $V_{base}=563.4$ V。根据上述分析，且假设风电场电压骤降为零（根据德国 E. on Netz 公司 LVRT 要求），故障前发电机以最高转速 1950 r/min 按功率因数 1 满载稳定运行。结合式 (5)、式 (12) 及式 (13)，由此确定 $R_{crow}=0.336$ pu（实际值 0.4Ω ）。图 4 给出了 2MW DFIG 机组采用计算的 Crowbar 电阻值在 PCC 节点发生 150 ms 三相对称短路故障及两相相间短路故障时投入 active Crowbar 的仿真结果。为有效观测故障过程中转子侧功率是否流入直流母线，当检测到电网故障时，封锁网侧变换器驱动脉冲直至故障切除。对比图 1，虽然 Crowbar 电阻的投入有效限制了转子侧电流，但故障过程中及故障切除后，DFIG 机组均存在较大幅值的电磁转矩振荡，如图 4(b) 所示。图 4(c) 则表明在计算的 Crowbar 电阻值的作用下，故障过程中有效阻隔了转子侧功率涌入直流母线；3.4 s 时的直流母线电压

的大幅波动是由于 Crowbar 电阻切除及转子侧变换器重新投入运行时，网侧变换器输入电流响应较为缓慢所致^[4]。此外，Crowbar 电阻在有效保护转子侧变换器的同时，亦可加速定子暂态直流磁链的衰减，从而降低由定子暂态直流磁链引起的转子侧过电流。图 4(a) 及图 4(a) 清晰的表明，在 Crowbar 电阻的作用下，转子暂态过电流的幅值在逐渐衰减。因此，对于三相对称短路故障，当暂态直流磁链衰减至一定程度时，可考虑切除 Crowbar 电阻，重新投入转子侧变换器对电网提供有效支持^[5,7]。而对于严重不对称短路故障，Crowbar 电阻的投入只能加速定子暂态直流磁链的衰减而无法使得定子磁场负序分量衰减，故在整个故障过程中定子磁场负序分量始终存在且在转子侧感生较大幅值的电势。由于转子侧变换器无法在故障过程中提供足够大的电压抵消此电势，因此为有效保护转子侧变换器，在整个严重不对称短路故障过程中 Crowbar 电阻均须接入转子绕组^[27]。

通过对转子短路保护技术在严重不对称电网故障下的分析及仿真研究表明：

1) 转子短路保护技术在电网故障期间可有效保护转子侧变换器及直流母线电容，但其将造成 DFIG 机组电磁转矩的大幅振荡，仿真结果中最大电磁转矩振幅超过 4 倍额定转矩值，这将对风机传动轴系特别是齿轮箱产生严重冲击，甚至导致其损坏（转轴及齿轮可承受的电磁转矩瞬态幅值为 2~2.5 倍额定转矩）。

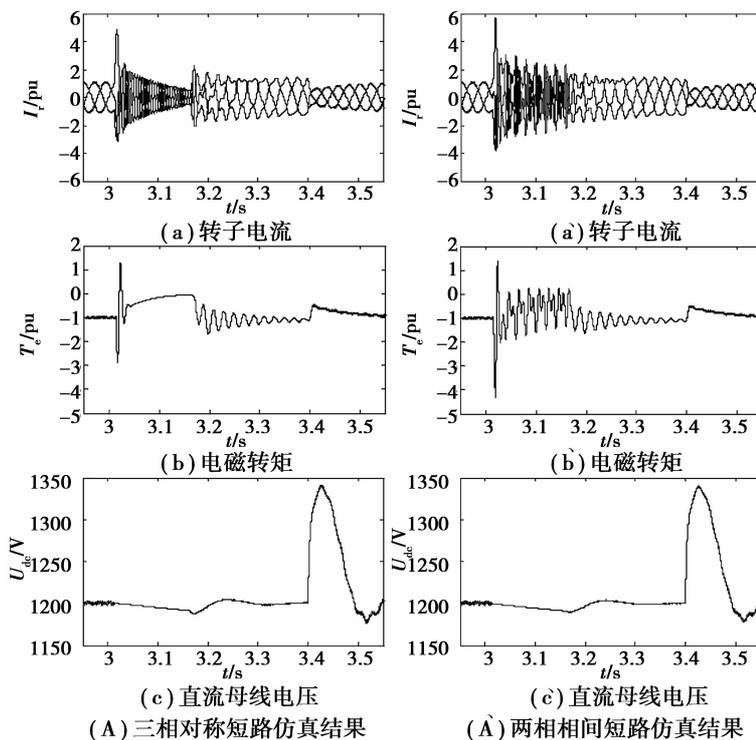


图 4 电网故障时 Crowbar 保护控制下 DFIG 机组仿真结果

2) 电网发生严重不对称短路故障时, 为有效保护转子侧变换器, Crowbar 电阻在整个故障过程中均无法切除, 这将导致 DFIG 机组在整个故障过程中以异步电机方式运行, 从电网吸收大量无功功率, 且无法参与系统功率调节。

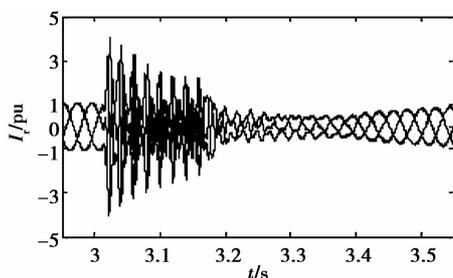
2.2 改进励磁控制策略

改进励磁控制策略^[9-11, 17-25]是在不增加硬件成本的基础上, 通过改进 DFIG 机组的励磁控制策略来实现机组的 LVRT 运行。较具代表性的是基于暂态磁链补偿控制的改进励磁控制策略^[9-10]。其针对电网故障时 DFIG 机组内部电磁变量的暂态特点, 通过适当控制励磁电压, 控制发电机漏磁链以抵消定子磁链中的暂态直流及负序分量对转子侧的影响。但此类控制方案的控制效果受发电机参数、发电机运行状态、外部条件、转子侧变频器参数等因素影响, 只能实现 DFIG 机组在一定电网故障范围内的 LVRT 运行控制。图 5 给出了采用基于暂态磁链补偿控制策略, 在 PCC 节点发生 150ms 两相相间短路故障时 DFIG 机组的仿真结果。从图中可以得出以下结论:

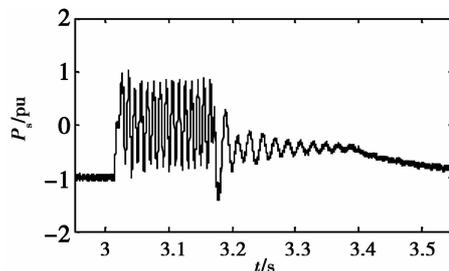
1) DFIG 机组在严重不对称短路故障过程中, 转子绕组电流幅值虽然得到了抑制, 但仍超过 2 倍额定峰值, 如图 5(a) 所示。这是由于故障过程中转子侧变换器无法提供足够的电压抵消定子暂态直流及负序磁链在转子侧感生电势所致。DFIG 机组若要实现安全穿越, 转子侧变换器不得不扩容。

2) DFIG 机组电磁转矩仍存在较大幅值的波动(仿真结果中最大电磁转矩振幅为 3.2 pu), 仍将严重威胁风机传动轴系特别是齿轮箱的安全运行。

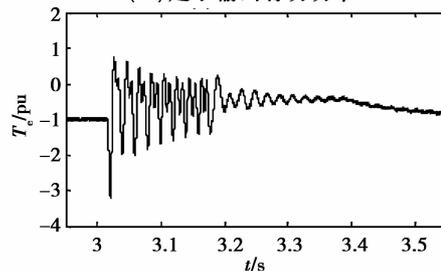
3) 不对称故障过程中, 定子有功功率输出仍存在较大幅值的 2 倍频振荡, 如图 5(b) 所示, 这是由于此类方案在故障过程中将转子侧变换器的全部容量用于抵消定子磁链的暂态直流及负序分量, 并未计及故障过程中的功率控制所致。同时, 由于电网电压的降低导致网侧变换器对直流母线电压的控制能力大幅减弱, 无法及时将 DFIG 机组转子侧过剩的能量输送至电网, 直流母线电压在故障过程中快速泵升; 此外, 功率波动亦会引起直流母线电压出现 2 倍频波动分量, 如图 5(d) 所示, 均将严重危及母线电容的安全。



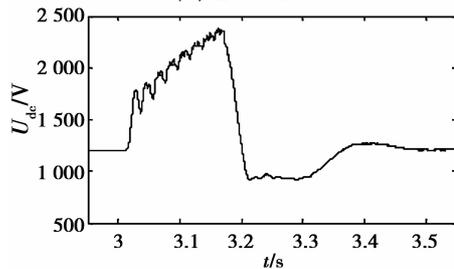
(a) 转子电流



(b) 定子输出有功功率



(c) 电磁转矩



(d) 直流母线电压

图 5 两相相间短路故障时采用改进励磁控制策略的 DFIG 机组仿真结果

2.3 定子侧串联网侧变换器方案

采用定子侧串联网侧变换器(SGSC)的 DFIG 机组拓扑结构如图 6 所示^[12-14]。在此拓扑下, 发电机定子电压矢量 u_s 将变为电网电压矢量 u_g 与串联变压器电压矢量 u_{series} 的合成矢量。通过控制 SGSC 的输出电压即可有效抑制 DFIG 定子侧出现的暂态直流及负序磁链分量; 转子侧变换器在整个故障过程中仍可采用传统的矢量控制策略对发电机进行有效控制, 对电网提供有效支持。图 7 给出了采用定子侧串联网侧变换器方案, 在 PCC 节点发生 150 ms 两相相间短路故障时的仿真结果。从图中可以得出以下结论:

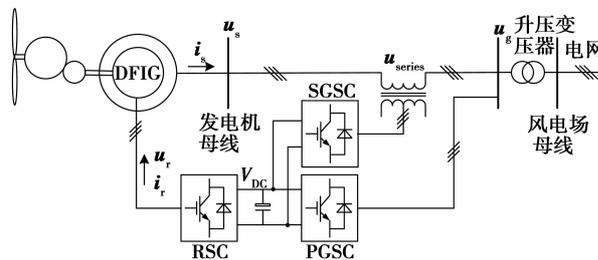


图 6 采用串联网侧变换器的 DFIG 机组结构图

1) 通过串联网侧变换器输出电压抑制 DFIG 定子侧出现的暂态直流及负序磁链分量, 在整个不对称电网故障过程中有效抑制了转子侧过电流的出现, 保证了转子侧变换器的安全运行, 如图 7(a) 所示。

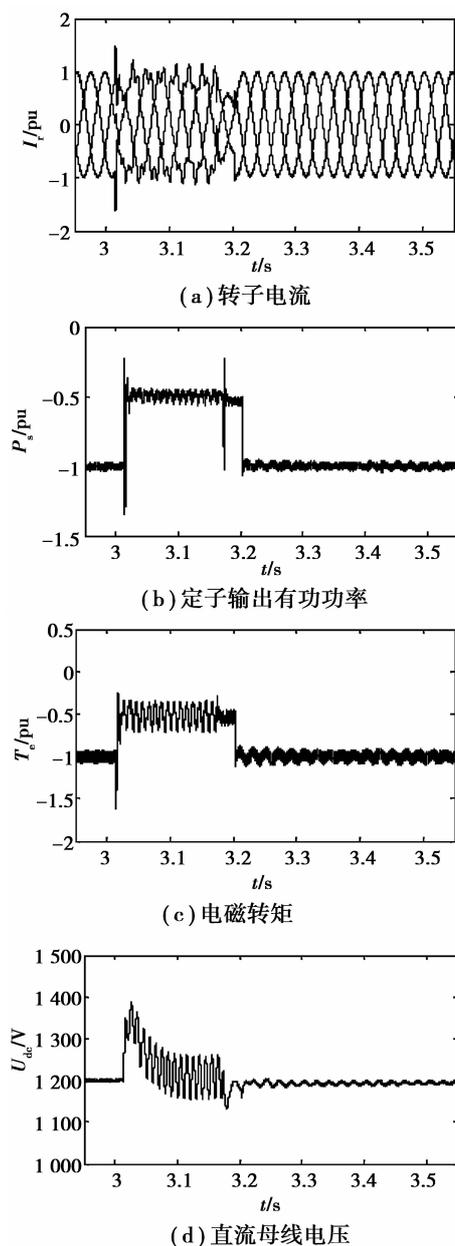


图 7 两相相间短路故障时采用串联网侧变换器的 DFIG 机组仿真结果

2) 转子侧变换器在整个故障过程中仍可采用传统的矢量控制策略对发电机进行有效控制, 并对电网提供有效支持。图 7(b)–(c) 中给出了 DFIG 机组在不对称短路故障过程中 DFIG 机组定子输出有功功率及电磁转矩波形图。相比于 Crowbar 方案及改进励磁控制策略, 采用串联网侧变换器方案有效

抑制了电磁转矩波动。图中有功功率及电磁转矩存在一定幅值的 2 倍频波动是由于串联网侧变换器在故障控制中只采用比例调节器, 发电机定子机端仍存在较小幅值的负序电压所致。

3) 虽然电网电压的降低将导致网侧变换器对直流母线电压的控制能力大幅减弱, 但在故障过程中, 通过对转子侧变换器的有效控制, 风机吸收的能量亦随电网电压的跌落程度相应降低, 这在很大程度上减轻了网侧变换器的调节压力。如图 7(d) 所示, DFIG 系统直流母线电压幅值在故障过程中得到了有效控制。直流母线电压中的 2 倍频波动分量是由于串联网侧变换器在故障过程中输出负序电压分量抵消电网电压负序分量对电机的影响将导致 2 倍频的波动功率流入直流母线; 同时, DFIG 系统定、转子有功功率中存在的少量 2 倍频波动功率亦会使得直流母线电压出现 2 倍频波动。

2.4 利用定子侧电子开关实现机组在故障过程中快速投切方案

文献[15]提出在 DFIG 定子和电网之间装设由反并联晶闸管构成的电子开关。当故障发生时, 通过适当的触发控制电子开关开通, 断开 DFIG 与电网的连接, 以保护机组的安全。故障切除后, 又可以通过电子开关将机组迅速投入电网实现对电网的支持。然而该方案在输电系统故障时发电机脱网运行, 因此并非真正意义上的发电机不脱网运行方案, 对电网恢复正常运行的支持作用非常有限。限于篇幅此处就不再赘述。

2.5 能量存储方案

能量存储系统(ESS)^[6,16-17]的拓扑结构如图 8 所示。该技术在电网故障时, 将过剩的能量通过与 DFIG 机组直流母线直接耦合的一个双向 DC/DC 变换器存储在电池或者超级电容器构成的储能装置中, 并在故障结束后将这些能量重新送至电网。采用该方案, 转子侧变换器在故障期间仍与转子绕组相连接, 维持对电机的励磁控制。此方案可使电机在任何工作点运行, 因此可以使得效率最优, 故可解决使用 Crowbar 须在各种运行状态间切换的问题, 避免了工况切换对系统造成的电磁暂态冲击^[6]。该方案的缺点也很明显, 它只能对直流母线电压进行控制而无法对转子电流进行有效控制, 若故障过程中转子侧变换器无法提供足够高的电势抵消定子暂态直流及负序磁链在转子侧感生电势, 转子侧仍将出现过电流。为避免转子侧变换器因过流而损坏, 转子侧变换器仍不得不扩容。

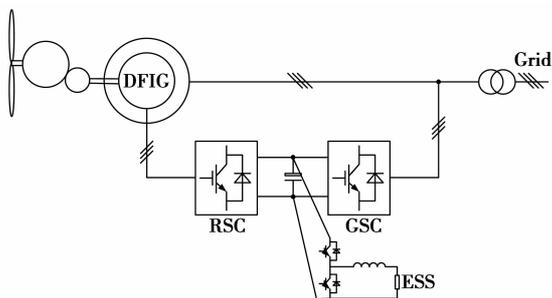


图 8 含能量存储系统的 DFIG 机组结构图

3 各种 LVRT 技术方案经济性分析

由相关研究、报道及前述分析可知,DFIG 系统在不增加硬件成本的基础上,只能实现电压跌落程度较小的故障穿越。随着并网规程的日益严格,利用辅助设备来帮助 DFIG 系统实现 LVRT 运行已成为一种必然^[6]。

在各种增加硬件的 LVRT 技术方案中,Crowbar 保护方案无疑是一种成本相对较低的解决方案,但由 2.1 节中的分析不难看出,由于故障时电机以异步电机方式运行,其将从电网吸收无功功率,因此发电机无法参与故障过程中的系统功率调节,无法满足电网规程的无功要求,对暂态过程中的电网电压稳定性不利^[28];从目前来看,即使采用 active Crowbar 的 DFIG 系统也无法满足最新的电网规程^[5]。已有一些学者和风机制造厂商考虑在风电场加装一系列大型 STATCOM 来帮助 DFIG 风场满足电网规程要求,这无疑将极大增加系统运行成本^[29-30]。另一方面,故障时采用 Crowbar 保护方式的双馈电机电磁转矩不可控且波动剧烈,这将对风机传动轴系特别是齿轮箱产生严重冲击,增加其疲劳程度,甚至导致齿轮箱损坏,文献[31]指出,在所有因风机故障造成的系统停机维护中,修复齿轮箱所需的停机维修时间是最长的,由此所付出的系统运行和维护代价极高。目前而言,采用 Crowbar 保护方式所存在的上述主要技术问题在短时间内还很难得到有效解决。

表 1 给出了两相相间短路故障时,发电机定子磁链各序分量的最大幅值及其在转子侧感生电势幅值。表中各量均为标幺值, p 为电压跌落程度。

表 1 两相相间短路故障时,DFIG 机组定子磁链各序分量幅值及其在转子侧感生电势

磁链分量	磁链幅值	转子侧感生电势
ψ'_{sp}	$1-p/2$	$(1-p/2) \times s$
ψ'_{sn}	$p/2$	$p/2 \times (2-s)$
ψ'_{sdc}	$0 \sim p$	$(0 \sim p) \times (1-s)$

由表 1 可知,DFIG 机组定子磁链暂态直流及负序分量在转子侧感生电势的最大幅值可达 1.3 pu 及 1.15 pu。转子侧变换器需提供与之相当的控制电压才能有效抑制转子侧过电流。这在实际机组中几乎是不可能实现的,DFIG 转子侧不可避免地将出现过电流。同时,大幅振荡的转子侧电流亦将引起电磁转矩的剧烈振荡。文中 2.2 节的改进控制算法采用了 SVPWM 及过调制技术其转子侧过电流仍达到了 4 pu;同时该控制策略并未考虑故障过程中的功率控制,若要在故障过程中输出一定的有功及无功功率,转子侧电流幅值将进一步增大。若要避免转子侧变换器因过流而损坏,其容量不得不扩大 1 倍以上。

对于能量存储方案,由于其在故障过程中只能对直流母线电压进行控制而无法对转子电流进行有效控制,转子侧变换器容量不得不扩大 1 倍以上;同时,直流侧储能装置的引入亦将大幅提高整个风电系统的成本。

对于严重不对称短路故障,从控制效果上看,采用串联网侧变换器方案无疑是一种较好的控制策略。在故障过程中 DFIG 机组转子侧变换器始终可控,使其在故障时可按系统要求参与电网功率调节;故障时发电机电磁转矩亦可控,对风机传动轴系的冲击可得到有效抑制。但其增加了一个串联网侧变换器及一个串联变压器,存在着成本较高及控制复杂的问题。对于图 6 所示的采用串联网侧变换器的 DFIG 系统拓扑,串联网侧变换器因与转子侧变换器共用直流母线,故其容量仅决定于流经串联网侧变换器的电流,即串联变压器的变比。在有效抑制定子暂态直流及负序磁链的前提下,根据 DFIG 系统直流母线电压值,合理的设计串联变压器的变比,降低流经串联网侧变换器的电流值将有助于降低串联网侧变换器的容量。

由以上分析不难看出,电力系统对 DFIG 风电机组的 LVRT 要求越高,其实现难度就越大,相应地所需增加的成本也越高。就目前为止,主流 DFIG 风电机组低电压穿越问题仍是一个世界性的难题,非常具有挑战性。

4 结 语

笔者结合仿真,比较研究了 DFIG 机组各种 LVRT 技术方案在不对称短路故障下的运行特性,阐述了它们的运行特点,并进一步探讨了各种 LVRT 方案的经济性,其结论如下:1)在电网发生严重不对称短路故障时,不增加硬件成本已无法实现

DFIG 机组的 LVRT 运行;增加硬件辅助 DFIG 机组实现 LVRT 运行已势在必行。2) Crowbar 保护技术虽然可以实现 DFIG 机组的 LVRT 运行,但在系统设计时,需考虑 Crowbar 投入引起的无功补偿问题及对风机传动轴系特别是齿轮箱的电磁暂态冲击。3) 串联网侧变换器方案使 DFIG 机组在故障时仍可按系统要求参与电网功率调节,具有较好的 LVRT 性能;但串联网侧变换器及串联变压器的引入使得该方案存在成本较高及控制复杂的问题;应根据当地 LVRT 要求合理的优化设计串联变压器变比以降低成本。4) 利用定子侧电子开关实现 DFIG 机组在故障过程中快速投切方案,并非真正意义上的发电机不脱网运行方案,对电网恢复正常运行的支持作用非常有限。5) 能量存储方案可有效抑制故障过程中的直流母线电压泵生,但其无法对转子电流进行有效控制;储能装置的引入亦将大幅提高系统的成本。

参考文献:

- [1] E. ON N G. Grid code regulations for high and extra high voltage[EB/OL]. [2006-04-01]. http://www.eon-netz.com/Resources/download_s/ENENARHS2006eng.pdf.
- [2] ERLICH I, WINTER W, DITTRICH A. Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the German transmission system [C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada; IEEE Press, 2006:1-7.
- [3] MORREN J, DE HANN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator [J]. Energy Conversion, 2007, 22(1):174-180.
- [4] 姚骏, 廖勇. 基于 Crowbar 保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23):79-83. YAO JUN, LIAO YONG. Analysis on the operations of an ac excited wind energy conversion system with crowbar protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23):79-83.
- [5] LOPEZ J, GUBIA E, OLEA E, et al. Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips [J]. Industrial Electronics, 2009, 56(10):4246-4254.
- [6] 王伟, 孙明冬, 朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23):84-89. WANG WEI, SUN MING-DONG, ZHU XIAODONG. Analysis on the low voltage ride through technology of DFIG [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23):84-89.
- [7] 张学广, 徐殿国. 电网对称故障下基于 active crowbar 双馈发电机控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1):99-103. ZHANG XUE-GUANG, XU DIAN-GUO. Research on control of DFIG with active crowbar under symmetry voltage fault condition [J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1):99-103.
- [8] 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 JIA-BING, SUN DAN, HE YI-KANG, et al. Modeling and control of DFIG wind generation system under grid voltage dip [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8):21-26.
- [9] XIANG D, RAN L, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through [J]. Energy Conversion, 2006, 21(3):652-662.
- [10] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3):164-170. XIANG DA-WEI, YANG SHUN-CHANG, RAN LI. Ride-through control strategy of a doubly fed induction generator for symmetrical grid fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):164-170.
- [11] 姚骏, 廖勇, 唐建平. 电网短路故障时交流励磁风力发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30):64-71. YAO JUN, LIAO YONG, TANG JIAN-PING. Ride-through control strategy of AC excited wind-power generator for grid short-circuit fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30):64-71.
- [12] FLANNERY P, VENKATARAMANAN G. A fault tolerant doubly fed induction generator wind turbine using a parallel grid side rectifier and series grid side converter [J]. Power Electronics, 2008, 23(3):1126-1135.
- [13] 廖勇, 李辉, 姚骏, 等. 采用串联网侧变换器的双馈风电机组低电压过渡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27):90-98. LIAO YONG, LI HUI, YAO JUN, et al. Low voltage ride-through control strategy of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid-side converter [J]. CSEE, 2009, 29(27):90-98.
- [14] FLANNERY P, VENKATARAMANAN G. Unbalanced voltage sag ride-through of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid-side converter [J]. Industry Applications, 2009, 45(5):1879-1887.
- [15] PETERSSON A, LUNDBERG S, THIRINGER T. A DFIG wind-turbine ride-through system influence on

- the energy production [C]// Proceedings of Nordic Wind Power Conference, March 1-2, 2004, Helsinki, Finland:[S. l.], 2004: 1-7.
- [16] ABBEY C, JOOS G. Supercapacitor energy storage for wind energy applications [J]. *Industry Applications*, 2007, 43(3):769-776.
- [17] LI W, JOOS G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm [C]// Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007, Orlando, Florida, USA; IEEE Press, 2007: 1280-1285.
- [18] GOMIS-BELLMUNT O, JUNYENT-FERRE A, SUMPER A, et al. Ride-through control of a doubly fed induction generator under unbalanced voltage sags[J]. *Energy Conversion*, 2008, 23(4):1036-1045.
- [19] XU L. Coordinated control of DFIG's rotor and grid side converters during network unbalance [J]. *Power Electronics*, 2008, 23(3):1041-1049.
- [20] ZHOU Y, BAUER P, FERREIRA J A, et al. Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition [J]. *Energy Conversion*, 2009, 24(1): 240-246.
- [21] HE Y, HU J. DFIG wind power generation systems during unbalanced network fault: analysis and operation [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, October 17-20, 2008, Wuhan, China:[S. l.], 2008: 2331-2336.
- [22] ZHOU P, HE Y, SUN D. Improved direct power control of a DFIG-based wind turbine during network unbalance[J]. *Power Electronics*, 2009, 24(11):2465-2474.
- [23] SANTOS-MARTIN D, RODRIGUEZ-AMENEDO J L, ARNALTES S. Providing ride-through capability to a doubly fed induction generator under unbalanced voltage dips[J]. *Power Electronics*, 2009, 24(7):1747-1757.
- [24] ZHI D, XU L. Direct power control of DFIG with constant switching frequency and improved transient performance [J]. *Energy Conversion*, 2007, 22(1):110-118.
- [25] 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(2):184-195.
- [26] LOPEZ J, GUBIA E, SANCHIS P, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips [J]. *Energy Conversion*, 2008, 23(1):321-330.
- [27] SEMAN S, NIIRANEN J, ARKKIO A. Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance [J]. *Power Systems*, 2006, 21(4):1782-1789.
- [28] ERLICH I, WILCH M, FELTES C. Reactive power generation by DFIG based wind farms with AC grid connection [C]// Proceedings of 2007 the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-5, 2007, Aalborg, Denmark:[S. l.], 2007:1-10.
- [29] LLORENTE J I, VISIERS M. Method and device for injecting reactive current during a mains supply voltage dip: USA, Worldwide Patent WO2006/089989 [P]. 2006-08-31.
- [30] QIAO W, VENAYAGAMOORTHY G K, HARLEY R G. Real-time implementation of a STATCOM on a wind farm equipped with doubly fed induction generators [J]. *Industry Applications*, 2009, 45(1): 98-107.
- [31] RIBRANT J, BERTLING L M. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005[J]. *Energy Conversion*, 2007, 22(1): 167-173.

(编辑 王维朗)