

基于转子串联电阻的双馈风力发电机低电压穿越

张文娟¹, 马浩森², 张国慨³, 张飞鸽¹

(1. 宝鸡文理学院 电子电气工程系, 陕西 宝鸡 721016;

2. 陕西师范大学 计算机科学学院, 陕西 西安 710062;

3. 中核四〇四有限公司, 甘肃 兰州 732850)

摘要: 讨论双馈风力发电机组低电压穿越中, 转子串联电阻控制方式时转子侧变流器有功、无功功率的分配原则, 给出有功、无功电流的极限表达式, 提出一种转子串联电阻低电压穿越功率协调控制策略。在电网电压跌落转子电流超过其阈值时, 该方案一方面控制转子变流器有功电流输出, 使其满足转子串联电阻投入后所消耗的有功功率; 另一方面考虑双馈电机暂态稳定性, 使双馈电机工作在无功支持模式, 优先向电网输出一定的感性无功功率。实验结果表明, 该控制方案具有比撬棒保护更好的暂态性能, 同时有助于电网电压的快速恢复, 有利于其他并网负载的安全运行。

关键词: 风电; 双馈感应电机; 低电压穿越; 转子串联电阻; 协调控制; 暂态

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.004

0 引言

近年来, 随着变速恒频双馈风力发电装机容量的不断增加, 现代电力规范要求风电机组在外部电网故障导致机端电压跌落时, 仍具有一定时间的不间断并网运行能力, 即具备低电压穿越 LVRT (Low Voltage Ride-Through) 能力^[1-2]。

目前国内外相关专家关于变速恒频双馈风力发电机组 LVRT 技术的研究主要集中在 2 个方面^[3-4]。其一是当电网故障引起机端电压出现小值跌落时, 通过改进转子励磁变流器控制算法来实现双馈感应电机 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) LVRT, 如文献[5]利用定子磁链的消磁方法实现 LVRT 控制算法; 文献[6]将非线性控制策略运用到 DFIG 控制中以提高系统的动态响应; 文献[7]通过在 DFIG 转子变流器控制中注入阻尼进而补偿故障时滞后的转子电压相位, 从而达到提高系统 LVRT 的能力。上述几种软件改进算法虽能在一定程度上改善系统故障性能, 但大都对电机参数具有较强的依赖性, 并且

对于电网故障引起机端电压出现较大幅度跌落时, 由于转子变流器自身功率的限制, 无法提供足够的转子电压去限制故障电流冲击, 难以较好地满足高质量并网需求。

与软件研究相比, 基于硬件研究的 LVRT 控制技术力图在电网故障时切入硬件保护电路, 以达到消耗系统多余能量的目的^[8]。目前就商用 MW 级风电机组而言, 硬件研究行之有效的办法是在 DFIG 转子侧附加合适的撬棒保护 (Crowbar protection) 电路^[9]。Crowbar 保护具有简单有效、经济成本低、便于实现等优点, 但其在投入工作后, DFIG 作为普通的感应电机与电网连接运行, 需从电网吸收大量无功功率, 将不利于跌落电网电压的恢复。针对于此, 文献[10]在文献[11]的基础上建议采用转子串电阻 RSDS (Rotor Series Damping Resistor) 方案来代替转子 Crowbar 保护, 并通过仿真研究了不同限流电阻对机组瞬态特性的影响, 为选择合适的转子限流电阻范围提供参考。但文献[10]在探讨限流电阻取值时并未考虑其大小对转子电压的影响, 较大转子电阻的投入虽可以加速转子过电流的衰减, 但却增大了控制所需转子电压; 并且串联转子电阻因过电流投入后, DFIG 有功、无功功率如何分配等问题, 文献[10]并未涉及到。鉴于此, 本文从故障期间机组整体需求角度出发, 实现了 DFIG 在电网电压跌落时, 转子串电阻 LVRT 与系统之间的协调控制: 一方面, 优化转子串联的限流电阻值, 确保 LVRT 期间转子变流器的安全; 另一方面, 充分利用转子串电阻 DFIG 的可控性, 提出根据系统需求合理分配 DFIG 有功、无功功率, 促使电网故障电压快速恢复的控制策略。通过 10 kW 双馈风力发电模拟平台进行了转子串电阻

收稿日期: 2015-04-23; 修回日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51207002); 陕西省科技厅工业攻关项目 (2013K07-12, 2014K06-28); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (2013JK1017); 西安市科技局技术转移促进工程项目 (CXY1347(4)); 中央高校基本科研业务费项目 (GK201402039); 宝鸡文理学院重点科研计划项目 (ZK11068)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51207002), the Industrial Research Project of Science and Technology Department of Shaanxi Province (2013K07-12, 2014K06-28), the Research Program of Education Department of Shaanxi Province (2013JK1017), the Technology Transfer to Promote Engineering Project of Xi'an Bureau of Science and Technology (CXY1347(4)), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (GK201402039) and the Key Research Program of Baoji University of Arts and Sciences (ZK11068)

功率协调控制实验研究,验证所提控制方案的正确性与可行性。

1 故障状态 DFIG 数学模型

在静止 abc 坐标系下,DFIG 的方程可写成如下形式^[12]:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \\ \mathbf{u}_r = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} - j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \\ \boldsymbol{\psi}_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{u}_s = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]^T$, $\mathbf{u}_r = [u_{ra} \ u_{rb} \ u_{rc}]^T$, 分别为定、转子电压; $\mathbf{i}_s = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$, $\mathbf{i}_r = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$, 分别为定、转子电流; $\boldsymbol{\psi}_s = [\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{sc}]^T$, $\boldsymbol{\psi}_r = [\psi_{ra} \ \psi_{rb} \ \psi_{rc}]^T$, 分别为定、转子磁链; $L_s > 0$, $L_r > 0$, $L_m > 0$ 分别为定、转子自感及互感; R_s , R_r 分别为定、转子电阻; ω_s , ω_r 分别为 DFIG 定、转子角速度。

若稳态运行时定子电压幅值为 U_0 , 假设 $t=0$ 时电网发生跌落深度为 p 的对称故障, 则跌落前后定子电压可写为:

$$\mathbf{u}_s = \begin{cases} U_0 e^{j\omega_s t} & t < t_0 \\ (1-p)U_0 e^{j\omega_s t} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (3)$$

根据磁链与电压的关系,忽略定子电阻,则根据式(1),故障前后定子稳态磁链可写为:

$$\boldsymbol{\psi}_{sf} = \begin{cases} \frac{U_0 e^{j\omega_s t}}{j\omega_s} & t < t_0 \\ \frac{(1-p)U_0 e^{j\omega_s t}}{j\omega_s} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4)$$

为了分析定子磁链及转子电流在故障期间的暂态变化情况,先假设转子开路,即 $\mathbf{i}_r = 0$, 据式(1)及式(2)可得定子磁链微分方程为:

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} = \mathbf{u}_s - \frac{R_s}{L_s} \boldsymbol{\psi}_s \quad (5)$$

根据电网电压跌落前后定子磁链不能突变的原则,上述定子磁链微分方程的解可分解为 2 个部分:一部分为以同步速旋转的定子磁链分量,其幅值大小由定子电压幅值决定;另一部分为定子电压突然跌落引起的定子磁链直流分量,该直流分量在空间保持静止,并以一定的时间常数衰减。据上述分析,结合式(4),得出故障期间定子磁链暂态表达式为:

$$\boldsymbol{\psi}_s = \frac{(1-p)U_0 e^{j\omega_s t}}{j\omega_s} + \frac{pU_0 e^{-R_s t/L_s}}{j\omega_s} \quad (6)$$

2 转子串联电阻 LVRT 控制策略

2.1 基于转子串联电阻控制的理论分析

据式(2)的磁链方程,将转子磁链写成定子磁链的表达形式为^[5]:

$$\boldsymbol{\psi}_r = \frac{L_m}{L_s} \boldsymbol{\psi}_s - \Delta L_r \mathbf{i}_r \quad (7)$$

其中, $\Delta L_r = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r}$ 。将式(6)及式(7)代入式(1)中的转子电压方程得:

$$\mathbf{u}_r = \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) \boldsymbol{\psi}_s + \left[R_r + \Delta L_r \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) \right] \mathbf{i}_r \quad (8)$$

式(8)等号右侧的第一项是由定子磁链变化引起的转子回路反电动势所对应的转子电压,若令

$$\mathbf{u}'_r = \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) \boldsymbol{\psi}_s \quad (9)$$

则电网故障时,转子电流的动态数学模型为:

$$\Delta L_r \frac{d\mathbf{i}_r}{dt} = \mathbf{u}_r - \mathbf{u}'_r - R_r \mathbf{i}_r + j\Delta L_r \omega_r \mathbf{i}_r \quad (10)$$

从式(10)可以看出,电网故障时,转子电流变化率与电网电压的跌落深度、转子角速度及转子电阻的大小有关系。在现场工况一定的条件下,可以通过适当增加转子电阻来抑制故障时刻转子电流变化率,即通过转子串电阻来代替转子 Crowbar 保护实现 DFIG 的 LVRT。

为了进一步说明转子串电阻控制对转子电流幅值的抑制作用,将式(6)及式(7)代入式(1)中的转子电压方程得转子电流为:

$$\mathbf{i}_r = \frac{\mathbf{u}_r - \mathbf{u}'_r + \Delta L_r \frac{d\mathbf{i}_r}{dt}}{R_r + j\Delta L_r \omega_r} \quad (11)$$

由前面分析可知,适当增加转子电阻可抑制故障时刻转子电流,因此,式(11)决定的转子电流随转子串联电阻的增大而减小。

转子串联电阻具体电路结构如图 1 所示。其中, L_{sg} , L_{rr} 分别为网侧变流器及转子侧变流器滤波电感。Chopper 为直流侧卸荷电路。稳态运行时,转子回路中的晶闸管控制开关导通,转子电流不流过旁路限流电阻 R_{rs} ; 当电网发生故障时,DFIG 定转子电流增大,传感器检测到转子电流阈值时,就迅速关断转子回路晶闸管控制开关,同时限流电阻 R_{rs} 串入转子回路从而快速释放定转子多余能量。当转子电流下降到规定阈值时,转子回路晶闸管控制开关再次导通, R_{rs} 从转子侧切除,恢复系统稳态运行。

2.2 转子串电阻阻值的设计

转子串电阻阻值的选取应遵循两方面的约束条件:其一,所串转子电阻的阻值应该足够大,以确保电网故障时转子电流在变流器所能承受的范围内;其二,所串转子电阻的阻值不能太大,以免转子电压超出变流器的安全余量。本文采用转子所串电阻 R_{rs} 的设计原则是:在保证故障电流不超过转子变流器所允许的最大电流前提下,尽量减小 R_{rs} 的阻值以降低所需的转子电压,最大限度拓宽双馈风电系统

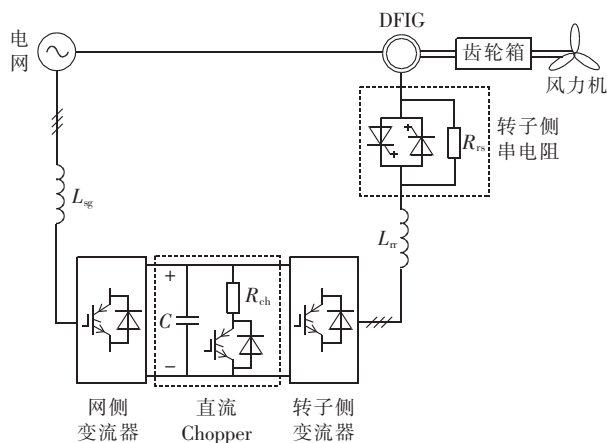


图 1 双馈风电机组转子串电阻结构框图

Fig.1 Block diagram of DFIG wind turbine unit with rotor series resistor

LVRT 的可控范围。

考虑最严重情况,即电网发生三相短路故障时,文献[13]给出了短路时转子电流最大值表达式:

$$I_{r\max} \approx \frac{1.8 U_s}{\sqrt{X_s^2 + R_s}} \quad (12)$$

其中, U_s 为 DFIG 定子端电压有效值; X_s 为定子等效电抗。

通常情况下,转子变流器所允许的最大电流 $I_{r\max}$ 为其额定电流 I_{re} 的 2 倍,即:

$$I_{r\max} = 2I_{re} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可知,要确保在任何时刻转子电流均不超过 $I_{r\max}$,转子所串电阻 R_{rs} 应满足:

$$R_{rs} \geq \frac{0.81 U_s^2}{I_{re}^2} - X_s^2 \quad (14)$$

考虑转子电压约束条件,设 $U_{r\max}$ 为转子变流器所能承受的最大耐压值,则:

$$U_{r\max} = I_{r\max} R_{rs} \quad (15)$$

要确保在任何时候转子电压均不超过 $U_{r\max}$,转子所串电阻 R_{rs} 应满足:

$$R_{rs} = \frac{U_{r\max}}{I_{r\max}} \leq \lambda \frac{U_{r\lim}}{I_{r\max}} = \lambda \frac{U_{r\lim}}{2I_{re}} \quad (16)$$

其中, $U_{r\lim}$ 为转子电压的安全限值; λ 为安全余量系数。综合式(14)和式(16),得 R_{rs} 的取值范围为:

$$\frac{0.81 U_s^2}{I_{re}^2} - X_s^2 \leq R_{rs} \leq \lambda \frac{U_{r\lim}}{2I_{re}} \quad (17)$$

2.3 转子串电阻功率协调控制策略

转子串电阻 DFIG 的 LVRT 控制不同于传统的转子 Crowbar 保护,在电网电压跌落时,DFIG 定子侧与电网并网的同时,转子侧检测到过电流,转子串联电阻投入,DFIG 仍处于可控运行。因此,如何利用 DFIG 的可控性,根据系统需求,寻求一种能充分发挥其动态无功支撑功能的 LVRT 方案就显得十分必要和迫切。为了分析转子串电阻 LVRT 期间 DFIG

的有功、无功功率特性,首先建立双馈变流器及 DFIG 的功率模型如图 2 所示。图中, P_t, Q_t 为双馈风电系统总的输入有功、无功功率; P_s, Q_s 为 DFIG 定子侧输入的有功、无功功率; P_r, Q_r 为 DFIG 转子侧输入的有功、无功功率; P_g, Q_g 为网侧变流器输入的有功、无功功率。

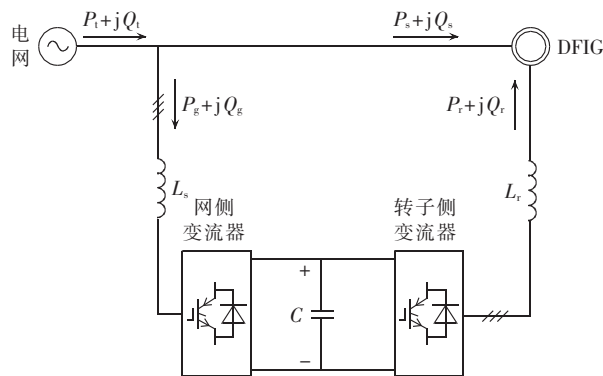


图 2 双馈风电机组功率模型图

Fig.2 Power model of DFIG wind turbine unit

根据系统的功率关系有^[14]:

$$\begin{cases} P_t = P_s + P_g \\ Q_t = Q_s + Q_g \end{cases} \quad (18)$$

忽略 DFIG 绕组铜损及铁损,定、转子功率关系可写成如下表达式:

$$\begin{cases} P_s = \frac{P_t}{1-s} \\ P_g = -\frac{sP_t}{1-s} \end{cases} \quad (19)$$

其中, s 为双馈电机转差率。

需要指出的是, LVRT 期间转子串电阻投入后, DFIG 转子侧输出的有功功率大小必须满足转子串联电阻 R_{rs} 消耗的有功功率,在此基础上,考虑 DFIG 暂态稳定性,补充电网恢复所需无功功率。根据这一原则,转子有功、无功电流可整定如下。

为了不使直流母线电压跌落,转子所串电阻 R_{rs} 消耗的有功功率按最大转子电流整定,即:

$$P_r = |I_{r\max}|^2 R_{re} = 4I_{re}^2 R_{re} \quad (20)$$

按图 2 所示功率流向,为保持直流母线电压输入输出功率平衡,网侧变流器及转子侧变流功率关系为:

$$P_g = P_r \approx -sP_s \quad (21)$$

当转子变流器控制采用定子磁链定向,忽略定子绕组电压降时, $u_{sd} = 0, u_{sq} = U_0 = \omega_s \psi_{sd}$, DFIG 定子有功功率可写为:

$$P_s = -\frac{3}{2} (U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq}) = -\frac{3}{2} \omega_s \psi_{sd} I_{sq} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_0 I_{sq} \quad (22)$$

将式(20)及式(21)代入式(22),得到转子串电阻时转子所需的有功电流为:

$$I_{rq} = \frac{8}{3} \frac{L_s I_{re}^2 R_{re}}{s L_m U_0} \tag{23}$$

因此,不超出转子变流器最大电流 I_{rmax} 的转子无功电流 I_{rd} 应满足:

$$I_{rd} \leq \sqrt{I_{rmax}^2 - I_{rq}^2} \tag{24}$$

电网电压跌落时,双馈风电机组输出无功功率有助于电网电压的恢复,但其发送无功的大小还应考虑 DFIG 暂态稳定性约束。据李雅普诺夫稳定性判据,保持 DFIG 暂态稳定性的必要条件为^[14]:

$$I_{rd} \leq \frac{2\psi_s}{L_m} = \frac{2U_0}{\omega_s L_m} \tag{25}$$

综合式(24)、(25),可得转子串联电阻期间转子变流器输出的无功电流指令限值为:

$$I_{rdmax} = \min \left\{ \sqrt{I_{rmax}^2 - I_{rqmax}^2}, \frac{2U_0}{\omega_s L_m} \right\} \tag{26}$$

式(23)—(26)分别构成了转子串联电阻 LVRT 期间转子侧变流器的有功、无功电流约束条件。图 3 给出了该方式下系统总的控制流程图。

- a. 当直流母线电压 U_{dc} 达到其阈值(本文设定为 1.1 倍直流母线额定电压)时,直流侧 Chopper 投入; U_{dc} 降到其阈值以下时,Chopper 电路切除。
- b. 当转子电流 I_r 达到其阈值(本文设定为 1.5 倍转子额定电流)时,转子串联电阻 R_{rs} 投入,转子侧变流器切换至功率协调控制模式,即按式(23)—(26)所述原则进行有功、无功功率分配;当 I_r 降到其阈值以下时,转子串联电阻电路切除,转子侧变流器恢复至正常控制模式,可采用之前的稳态控制,也可利用故障期间其他主动控制技术更好地改善双馈风电机组的 LVRT 性能。

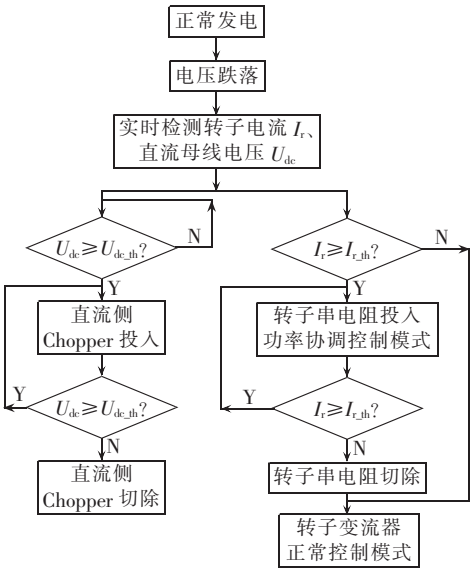


图 3 转子串联电阻系统控制流程图
Fig.3 Flowchart of rotor series resistor system control

3 实验结果

为了验证转子串电阻方式下 LVRT 功率协调控制策略的有效性,对其进行了实验研究。具体实验参数为:DFIG 额定功率 $P=10\text{ kW}$;极对数 $n_p=3$;频率 $f=50\text{ Hz}$;定子联结方式 Y 接, $R_s=0.7\text{ }\Omega$, $L_s=2.1\text{ mH}$;转子联结方式 Y 接,折算到定子侧后, $R_r=0.59\text{ }\Omega$, $L_r=4.1\text{ mH}$;互感 $L_m=72.6\text{ mH}$ 。采用自制的阻抗型电压跌落发生器模拟电网电压跌落故障,故障前 DFIG 转速为 917 r/min,定子侧输出有功功率 6.5 kW。系统控制采用 Ti 公司 DSP TMS320F28335 芯片实现,实验波形通过 Tek 公司 DPO 3054 示波器捕获。

图 4、图 5、图 6 为电网发生三相对称故障时 DFIG 的端电压 u_t 降到故障前的 50%、故障持续时间 625 ms,转子侧变流器分别采用传统的 Crowbar 保护控制和转子串联电阻 LVRT 控制策略的直流母线电压 U_{dc} 、转子电流 i_r 及定子电流 i_s 实验波形对比图。

图 4(a)为传统的 Crowbar 控制直流母线电压,稳态运行时直流侧额定电压为 650 V,电网故障开始和结束时,检测到转子电流及直流侧电压超过阈值时,直流侧 Chopper 及转子侧 Crowbar 投入运行,但 Crowbar 的投入必须封锁转子侧变流器脉冲,从而破坏了网侧变流器及转子侧变流器的稳态功率平衡关系,因此使得直流母线电压升高至 785 V。图 4(b)为转子串联电阻控制,可以看出,故障开始及结束时,直流母线电压变化平稳,最大值只有 720 V。

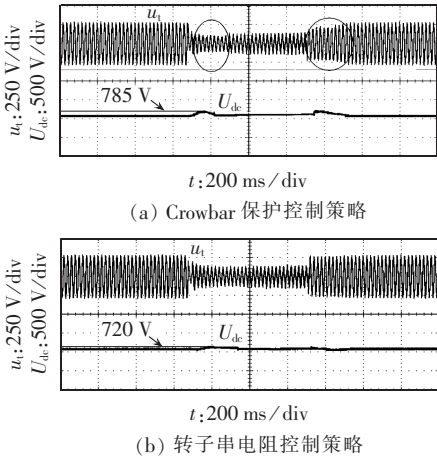


图 4 直流母线电压对比波形
Fig.4 Comparison of DC bus voltage waveforms

图 5 为转子电流对比波形,相比于 Crowbar 保护,图 5(b)中转子串联电阻投入后, LVRT 过程采用本文提出的功率协调控制策略,即使转子侧输出有功功率在满足转子所串电阻消耗的有功功率基础上,采用无功功率优先控制,因此及时补充了故障电压恢复所需的无功功率,并未出现电网故障电压二次下降的情况。而在图 5(a)的 Crowbar 控制中,Crowbar

保护投入后,DFIG 工作在普通异步发电机模式需从电网吸收大量无功功率,因此导致故障电压进一步下降,这对电网电压的恢复是极其不利的。

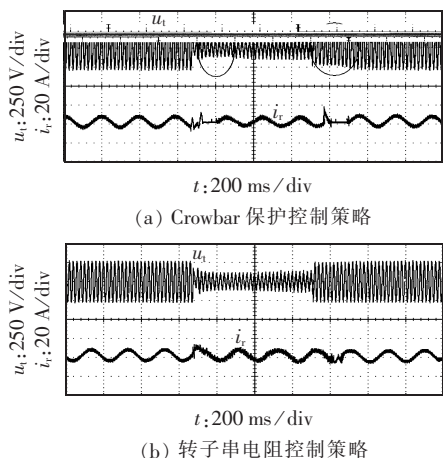


图 5 转子电流对比波形

Fig.5 Comparison of rotor current waveforms

图 6 为定子电流对比波形。可以看出,采用 Crowbar 保护控制,DFIG 定子电流在故障开始和结束时明显的过电流,而在转子串电阻功率协调控制方式下,定子过电流明显改善,但在转子串联电阻投入后,定子电流大小略有下降,这跟系统设置的无功优先控制原则有关,待转子串联电阻切除后,定子继续向电网供电,以帮助电网故障电压恢复。

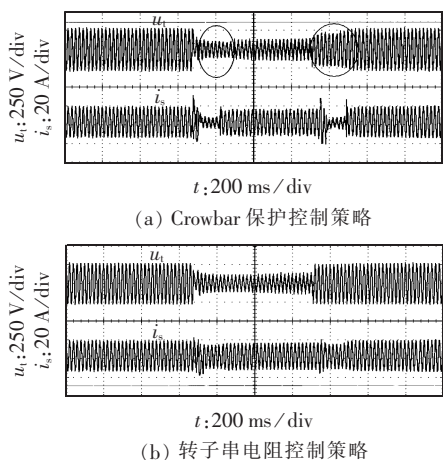


图 6 定子电流对比波形

Fig.6 Comparison of stator current waveforms

4 结论

为了改善双馈风力发电系统 LVRT 过程中,转子 Crowbar 保护投入后 DFIG 不可控状态,本文在深入分析电网电压跌落时转子电流动态数学模型基础上,采用转子串联电阻控制来代替 Crowbar 保护。

a. 提出在转子串联电阻投入后,充分利用 DFIG 的可控性,在确保转子所需及 DFIG 暂态稳定性基础上,采用无功功率优先控制原则,及时补充电网电

压恢复所需的无功功率。

b. 所提控制策略在一台 10 kW 双馈风力发电机组上进行了实验验证。实验结果表明,转子串电阻 LVRT 功率协调控制具有比 Crowbar 保护更好的暂态性能。

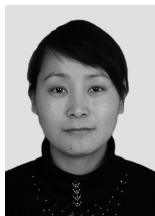
参考文献:

- [1] 向昌明,范立新,蒋一泉,等. 风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):91-97.
XIANG Changming,FAN Lixin,JIANG Yiquan,et al. Analysis of cascading trip-off mechanism and low voltage ride through capability of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(12):91-97.
- [2] 张文娟,高勇. 考虑主、漏磁路饱和的双馈风电低电压穿越动态性能分析[J]. 电网技术,2013,37(7):1995-1999.
ZHANG Wenjuan,GAO Yong. Analysis on dynamic performance of low voltage ride-through of doubly fed induction generator considering main flux saturation and leakage flux saturation[J]. Power System Technology,2013,37(7):1995-1999.
- [3] 蔚兰,陈宇晨,陈国呈,等. 双馈感应风力发电机低电压穿越控制策略的理论分析与实验研究[J]. 电工技术学报,2011,26(7):30-36.
YU Lan,CHEN Yuchen,CHEN Guocheng,et al. A low voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(7):30-36.
- [4] MOHAMMADI J,AFSHARNIA S,VAEZ-ZADEH S. Efficient fault-ride-through control strategy of DFIG-based wind turbines during the grid faults[J]. Energy Conversion and Management,2014,78(2):88-95.
- [5] 杨淑英,陈银,周天保,等. 低电压穿越过程中双馈风电机组虚拟电感暂态自灭磁控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(4):12-18.
YANG Shuying,CHEN Yin,ZHOU Tianbao,et al. Virtual inductance based self-demagnetization control for doubly-fed induction generator wind turbines during low voltage ride-through process[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(4):12-18.
- [6] AMUTHAN N,SUBBURAJ P,MARY P M. Direct model reference adaptive internal model controller for better voltage sag ride through in doubly fed induction generator wind farms[J]. Electrical Power and Energy Systems,2013,47:255-263.
- [7] RAHIMI M,PARNIANI M. Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2010,25(3):873-883.
- [8] 邓友汉,肖志怀,程远楚,等. 基于 DBR 的交直流复用 Crowbar 低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):15-19.
DENG Youhan,XIAO Zhihui,CHENG Yuanchu,et al. AC-DC multiplexing Crowbar LVRT scheme based on DBR[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):15-19.
- [9] XIE D,XU Z,YANG L,et al. A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(33):2-10.
- [10] 凌禹,蔡旭. 基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术

- [J]. 电力自动化设备,2014,34(8):25-30.
- LING Yu,CAI Xu. Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):25-30.
- [11] RAHIMI M,PARNIANI M. Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(2):514-525.
- [12] 栗然,王倩,卢云,等. Crowbar 阻值对双馈感应发电机低电压穿越特性的影响[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):101-107.
- LI Ran,WANG Qian,LU Yun,et al. Impact of Crowbar resistance on low voltage ride through of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):101-107.
- [13] MORREN J,HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(1):174-180.
- [14] 徐海亮,章玮,陈建生,等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):112-119.

XU Hailiang,ZHANG Wei,CHEN Jiansheng,et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(36):112-119.

作者简介:



张文娟

张文娟(1981—),女,陕西宝鸡人,副教授,博士,从事大型变速恒频双馈风力发电及电力电子技术研究(E-mail:zhangwj19811130@163.com);

马浩森(1981—),女,陕西渭南人,副教授,博士,从事双馈风力发电及电力电子技术研究;

张国慨(1976—),男,山东平度人,工程师,硕士,从事智能电网和风力发电技术研究;

张飞鸽(1986—),女,陕西周至人,硕士,从事无线传感器网络技术研究。

Low voltage ride-through of doubly-fed induction generator based on rotor series resistor

ZHANG Wenjuan¹,MA Haomiao²,ZHANG Guokai³,ZHANG Feige¹

(1. Department of Electron and Electricity Engineering,Baoji University of Arts and Sciences,Baoji 721016,China;

2. School of Computer Science,Shaanxi Normal University,Xi'an 710062,China;

3. The 404 Ltd.,CNNC,Lanzhou 732850,China)

Abstract: The principle of active and reactive power assignment in the rotor series resistor control mode for the rotor-side converter of DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) during the LVRT(Low Voltage Ride-Through) is discussed,the expressions of their active and reactive current limits are given and a corresponding scheme of coordinated LVRT power control is put forward. When the rotor current exceeds its threshold due to the grid voltage sag,on the one hand,the output active current of grid-side converter is controlled to match the active power consumption of the operating rotor series resistor;on the other hand,the DFIG,for its transient stability,is set in the reactive power supporting mode to preferentially output a certain inductive reactive power to grid. The experimental results show that,compared with the Crowbar protection,the proposed control scheme has better transient performance,beneficial to the fast recovery of grid voltage and the safe operation of other grid-connected loads.

Key words: wind power; doubly-fed induction generator; low voltage ride-through; rotor series resistor; coordinated control; transients