

双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析

赵霞, 王倩, 邵彬, 何美华

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于双馈感应发电机(DFIG)风力发电系统模型, 通过分析电网电压跌落情况下的各种运行状况, 提出在电网严重故障期间, 采用 Active Crowbar 电路和直流侧卸荷电路保护变流器和避免直流侧电压过压。在电网故障恢复期间, Crowbar 电路的再次投入使得系统无功需求增大。并在网侧变流器的功率容量范围内, 提出一种网侧变流器无功功率的控制策略来实现对电网无功支持, 以助于电网故障恢复以及加快机端电压恢复。基于 PSCAD/EMTDC 平台建立了仿真系统模型并验证了该控制策略的有效性。该控制策略满足了风电机组并网的低电压穿越, 有效提高了 DFIG 风电机组运行的可靠性。

关键词: 双馈电机; 电压跌落; Active Crowbar; 直流侧卸荷电路; 无功支持

Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator

ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, HE Meihua

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on double fed induction generator (DFIG) wind power system model, by analyzing the grid voltage drop under various operational performance, this paper proposes the use of Active Crowbar Circuit and DC-chopper in order to protect the converter and avoid DC-link over-voltages during grid serious faults. Crowbar circuit being into again makes the demand of the reactive power increase during the recovery of the grid voltage; grid-side converter (GSC) in the range of power capacity, a new control strategy for GSC reactive power is proposed to achieve the reactive power support to help the recovery of the grid faults and the stator voltage. Simulation system model is built by using PSCAD/EMTDC and the validity of the proposed control strategy is proved. The control strategy meets low voltage ride through (LVRT) of DFIG, and effectively improves the reliability of the DFIG operation.

Key words: DFIG; voltage dips; Active Crowbar; DC-chopper circuit; reactive support

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0057-08

0 引言

随着风电容量不断增加, 在电网电压跌落严重的情况下, 风电机组会因自保而脱网, 严重时导致电网崩溃, 风力发电机的低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力是一个需要解决的问题。DFIG并网运行, 定子绕组又直接挂网, 当电网因故障出现电压骤降时, 定转子磁场的耦合作用, 在转子侧会感应出较大的过电流和过电压, 特别是对变流器造成严重影响^[1]。许多学者对风电机组的控制策略和保护原理进行了大量研究, 电网电压轻微跌落的情况时, 可以通过对控制策略进行改进实现LVRT^[2-4], 当电网发生很严重的故障后, 仅仅改进控制策略已经不能满足低电压穿越的要求, 应该加入硬件保护电路; 对此许多

学者提出了简单硬件保护与改进控制策略相结合的LVRT实现方案, 得到了工程界的广泛认可和采纳, 文献[5]提出了一种新型的电阻串联电容式撬棒结构, 但是该方法考虑到经济性, 电容的选择也是个难题。文献[6-8]提出在母线电容器两侧并联卸荷电阻的“直流Crowbar”方式; 文献[9]采用了撬棒电路和直流卸荷电路结合实现LVRT, 并提出一种无功策略, 但由于定子绕组侧电压无法随电网电压同步恢复, 使得这种无功策略在故障切除后无法向系统提供足够的无功功率加快机端电压恢复。文献[10]指出网侧变流器的控制带宽明显高于发电机组, 可对电网故障迅速做出反应, 文献[11]提出一种新型无功优化控制策略, 但是没有考虑Crowbar电路切入产生暂态响应。

为了解决当电网发生故障后, 直流母线过电压

和定转子过电流、过电压的问题，以及Crowbar 电路的切入，使系统能发出足够的无功功率帮助电网电压的恢复，同时在故障切除后加快机端电压恢复。本文在上述研究的基础上，根据DFIG的数学模型分析了当并网点突然发生三相短路时动态响应特性；并通过改进网侧变换器控制策略和硬件保护相结合的低电压穿越控制方法，保护转子变换器和限制直流母线过电压，并在电网电压恢复期间向系统提供有功和无功支撑，来满足并网规程中低电压穿越运行的基本要求。

1 风力发电并网运行要求

国家电网提出的低电压穿越要求^[12]如图1所示，电力系统发生不同类型故障时，只有当并网点电压在图1所示曲线以下时，才允许发电机组脱网。要求其有功功率在故障清除后应快速恢复，自故障清除时刻开始，以至少10%额定功率/秒的功率变化率恢复至故障前的值。同时，还要求在LVRT 期间，电网电压每跌落1%就要至少提供1.5%的无功电流，用以支撑电压恢复。

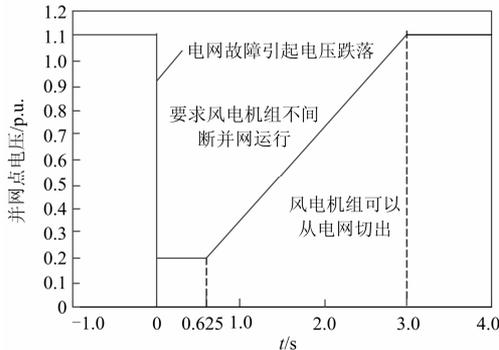


图1 国家电网低电压穿越要求

Fig. 1 LVRT requirement of state grid

2 DFIG模型和暂态分析

2.1 DFIG 模型

图2给出了一种典型的含主动型Crowbar保护电路和直流侧卸荷电路的变速恒频DFIG风力发电系统原理图。

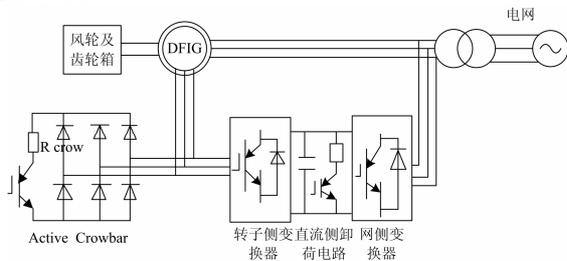


图2 DFIG风力发电系统原理图

Fig. 2 DFIG wind power system schematics

假设定、转子均采用电动机惯例，DFIG的数学模型为^[13-15]

$$\begin{cases} U_s = R_s i_s + jw_0 \psi_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ U_r = R_r i_r + jw_s \psi_r + \frac{d\psi_r}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_{ss} i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_m i_s + L_{rr} i_r \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{dc} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_g - P_r \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_{ss} = L_s + L_m \\ L_{rr} = L_r + L_m \end{cases} \quad (4)$$

式中： U 、 i 、 ψ 分别为电压、电流、磁链； R 、 L 分别为电阻、电感； w_0 为定子电压角频率； w_s 为转差角频率； w_r 为转子角频率；下标s、r分别表示定子、转子分量； L_s 、 L_r 为定、转子漏感； L_m 为定、转子互感； C_{dc} 为直流母线侧电容； P_g 、 P_s 分别为网侧变换器和转子侧变换器输入功率。

根据式(4)可得

$$\begin{cases} i_s = \frac{\psi_s}{L'_{ss}} - \frac{L_m}{L'_{rr}} \frac{1}{L'_{ss}} \psi_r \\ i_r = -\frac{L_m}{L_{ss}} \frac{1}{L'_{rr}} \psi_s + \frac{\psi_r}{L'_{rr}} \end{cases} \quad (5)$$

其中：

$$\begin{cases} L'_{ss} = L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} = L_s + \frac{L_r L_m}{L_r + L_m} \\ L'_{rr} = L_{rr} - \frac{L_m^2}{L_{ss}} = L_r + \frac{L_s L_m}{L_s + L_m} \end{cases} \quad (6)$$

在稳态运行时可得

$$U_s = w_0 \psi_s \quad (7)$$

2.2 三相短路故障的暂态分析

2.2.1 故障时双馈电机暂态分析

当电网突然发生对地短路故障时，则定子端电压矢量表示为

$$E_g = jaU_s \quad (8)$$

其中： U_s 是电网故障发生前的发电机定子电压； a 为定子电压因故障而降落到百分比。

假设电网在 $t = t_0$ 时发生故障，由式(1)可得

$$jaU_s = R_s i_s + jw_0 \psi_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (9)$$

忽略定子电阻的条件下，可以求解该方程得

$$\psi_{st} = a\psi_{s0} + (1-a)\psi_{s0}e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (10)$$

其中, $T_s = \frac{L'_{ss}}{R_s}$, 假设故障发生前系统稳定运行则

$$\psi_s(t_0) = \psi_{s0}。$$

忽略转子电流的瞬间动态变化, 转子电压和定子电压关系可表示为

$$U_r \approx jaU_s - j\omega_r \psi_s \quad (11)$$

则故障发生后的转子电压可得

$$U_{rt} \approx jaU_s \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_0}\right) - j \left\{ \frac{(1-a)U_s}{\omega_0} \right\} \omega_r e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (12)$$

由此式可知电网跌落越深, DFIG转子电压的振荡幅值越大; 因转子、定子之间的强耦合, 式(10)中的第二项定子磁链的直流分量会在电机转子中产生与转子转速成正比的旋转电动势, 且电压骤降将导致电磁转矩变小, 运行转差增大, 使反馈入转子的功率增加, 进一步引起转子回路的过电压。

由以上分析可知, 当双馈感应发电机定子端直接短路时, 其定子端电压降低为0, 即 $U_s = 0$ 时, 情况最为严重, 对系统的危害也最大, 则其定子磁链变为

$$\psi_{st} = \psi_{s0} e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} = \frac{E_g}{\omega_0} e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t}{T_s}} = \psi_{s0} e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (13)$$

同理可得转子磁链为

$$\psi_{rt} = \psi_{r0} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} = \frac{L_m E_g}{L_{ss} \omega_0} e^{-j\omega_0 t} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入式(5)可得

$$\begin{cases} i_s = \frac{E_g}{L'_{ss} \omega_0} e^{-j\omega_0 t} \left(e^{-\frac{t}{T_s}} - \frac{L_m^2}{L_{rt} L_s} e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \\ i_r = \frac{L_m}{L'_{rt}} \frac{E_g}{L_{ss} \omega_0} e^{-j\omega_0 t} \left(e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{T_r}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \end{cases} \quad (15)$$

并网发生三相短路故障后定、转子最大电流可近似表达为

$$\begin{cases} i_{s\max} = \frac{E_g}{L'_{ss} \omega_0} \left(e^{-\frac{t}{T_s}} + \frac{L_m^2}{L_{rt} L_s} e^{-\frac{t}{T_r}} \right) \\ i_{r\max} = -\frac{L_m}{L'_{rt}} \frac{E_g}{L_{ss} \omega_0} \left(e^{-\frac{t}{T_r}} + e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \end{cases} \quad (16)$$

电网跌落程度越深, 直流母线过电压越严重, 即使封锁转子侧变流器脉冲, 电流也会给直流电容充电, 引起直流侧电压的升高^[9]。

2.2.2 故障排除时双馈电机暂态分析

据文献[16]的理论可知, 假设在 t_1 时刻电网电

压恢复, 即有定子电压

$$\begin{cases} U_s(t_0 \leq t < t_1) = 0 \\ U_s(t \geq t_1) = U_s e^{-j\omega_0 t} \end{cases} \quad (17)$$

因定子磁链初始值不确定, 将式(17)代入式(9)得

$$\begin{aligned} \psi_{st}(t \geq t_1) &= \psi_{sf} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} e^{j\omega_0 t}\right) e^{-j\omega_0 t} + \psi_{s0} e^{-\frac{t+t_1-t_0}{T_0}} = \\ & \psi_{sf} e^{-j\omega_0 t} - \psi_{sf} e^{-\frac{t}{T_0}} + \psi_{s0} e^{-\frac{t+t_1-t_0}{T_0}} \end{aligned} \quad (18)$$

在同步旋转坐标系下, 式(18)写成

$$\psi_{sn}(t \geq t_1) = \psi_{sf} + \frac{U_s}{j\omega_0} \left(e^{-\frac{t+t_1-t_0}{T_0}} e^{-j\omega_0(t+t_1-t_0)} - e^{-\frac{t}{T_0}} e^{-j\omega_0 t} \right) \quad (19)$$

根据电网电压恢复时刻, 定子磁链振荡情况如下。

① 当 $t_1 - t_0 = \frac{T}{2}$ ($T = 2\pi/\omega_0$) 时电网电压恢复时刻的定子磁链振荡幅值最大, 即

$$\psi_{sn}(t = t_1) \approx \psi_{sf} + \frac{2U_s}{j\omega_0} \quad (20)$$

② 当 $t_1 - t_0 = T$ 时电网电压恢复时刻的定子磁链振荡幅值最小, 即

$$\psi_{sn}(t = t_1) \approx \psi_{sf} \quad (21)$$

③ 而当 $t_1 - t_0$ 时间很长, 定子磁链振荡幅值为

$$\psi_{sn}(t = t_1) \approx \psi_{sf} + \frac{U_s}{j\omega_0} \quad (22)$$

由式(19)可知, 电网电压恢复时刻不同使得定子磁链振幅不同, 从而对转子电压也会产生不同影响。

如果Crowbar电路的接入, 转子侧变流器断开, 假设 $i_r = 0$, 由式(1)、式(2)可得

$$U_r = \frac{L_m}{L_{ss}} \left(\frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \right) \quad (23)$$

将式(19)代入式(23)可以得到转子开路时转子电压, 在同步旋转坐标系下方程为

$$\begin{aligned} U_r \approx & \frac{L_m}{L_{ss}} s U_s + \frac{L_m}{L_{ss}} (1-s) U_s \left(e^{-\frac{t}{T_s}} e^{-j\omega_0 t} - \right. \\ & \left. e^{-j\omega_0 t} e^{-\frac{t+t_1-t_0}{T_0}} e^{-j\omega_0(t+t_1-t_0)} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可得到定子磁链振荡的转子电压值。

① 第一种情况下

$$U_{r\max}(t = t_1) \approx \frac{L_m}{L_{ss}} (2-s) U_s \quad (25)$$

② 第二种情况下

$$U_{r\max}(t=t_1) \approx \frac{L_m}{L_{ss}} s U_s \quad (26)$$

③ 第三种情况下

$$U_{r\max}(t=t_1) \approx \frac{L_m}{L_{ss}} U_s \quad (27)$$

因此电网电压恢复时刻的不同, 定子磁链的振荡情况也会不同, 转子在恢复时刻的电压也会不同, 引起暂态效果随之也不同。

3 Crowbar电路和直流侧卸荷电路控制策略

Crowbar电路的电阻太大, 在Crowbar电路切除的时候可能会造成转矩、无功功率的剧烈振荡以及钳位效应^[17]; 电阻太小, 使之不能抑制过电流。根据文献^[18]可得Crowbar电路电阻的取值范围, 即

$$R_{cb} < \frac{\sqrt{2}U_{r\max}w_0L'_{ss}}{\sqrt{3.2U_s^2 - 2U_{r\max}^2}} \quad (28)$$

式中, $U_{r\max}$ 为转子电压最大的有效值。

当直流母线电压超过800 V时, 触发直流侧卸荷电路保护直流电容; 当检测到转子电流超过额定电流2倍时投入Crowbar电路并封锁转子侧变流器脉冲。

当发生转子侧过电流切入Crowbar电路后, 会增加电网的无功需求, 不利于电网电压的恢复。文献^[1,19]提到, Crowbar电路一旦投入, 应在电网故障清除前切除Crowbar电路, 并且文献^[19]提出Crowbar电路的切除时间离故障清除时间越短, 系统的响应越理想。文献^[20]提出合适的Crowbar电路退出运行时刻应在转子暂态电流得到有效衰减和故障清除前1个周波(甚至更长)之间, 可以减小恢复时暂态扰动。因此本文Crowbar电路投入后当转子电流衰减到稳态时退出。

4 无功功率的控制策略

按照LVRT要求, 风电场必须在电网电压跌落时发送足够无功功率, 用以帮助电网电压的恢复, 风电场注入电力系统的动态无功电流 $IT \geq 1.5 \times (0.9 - U_s)IN$ ($0.2 \leq U_s \leq 0.9$)。根据式(29)可以得到风电场注入电力系统的动态无功功率 ≥ 0.315 p.u.。

$$QG = \frac{3}{2}(U_{qs}i_{dg} - U_{ds}i_{qg}) = -\frac{3}{2}|\dot{U}_s| i_{qg} \quad (29)$$

网侧变流器原有控制策略如图3所示。

本文对原有的控制策略进行改进如图4所示, 当系统正常运行时候无功电流给定值为0, 系统运行在

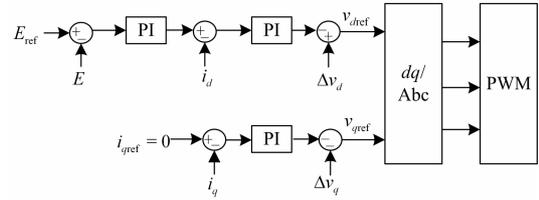


图3 网侧变流器原有控制策略

Fig. 3 Grid-side converter (GSC) original control strategy

单位功率因数模式; 当系统发生故障, 网侧变流器的无功控制采用另一种模式即通过机端电压幅值与给定的额定值比较, 经过PI调节后得到无功功率的给定值, 无功功率的给定值再与实际无功功率比较得到网侧变流器无功电流给定值。因为机端电压恢复是一个动态过程, 考虑Crowbar电路的再次切入, 使得Crowbar电路从电网吸收更多的无功功率, 所以当检测到机端电压恢复后, 网侧变流器无功电流给定值才立刻变为0, 来减少系统动态响应, 同时也有助于机端电压的恢复。

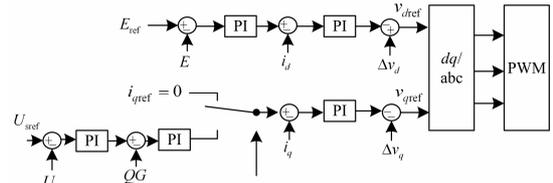


图4 网侧变流器新的控制策略

Fig. 4 Grid-side converter (GSC) new control strategy

PI调节器传递函数可表示为

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p(s + \frac{1}{\tau_i})}{s} \quad (30)$$

式中, K_p 、 K_i 、 τ_i 分别为比例系数、积分系数、积分时间常数。原有控制策略采用了典型的电压电流双闭环控制, 即电流PI调节器按照典型一型系统设计以及直流母线电压PI调节器按照典型二阶系统设计; 改进的新控制策略, 电流PI调节器仍按照典型一型系统设计, 新加入的两个PI调节器则根据二阶系统设计。新的控制策略下, 当电网短路使得机端电压降低, 流入电压PI调节器的电压偏差增大, 无功功率基准值随之将增大, 这样也就会让定子无功电流给定值增大, 用以满足低电压穿越的无功需求。若采用原有的方法无功电流给定值始终为0, 不能为系统提供所需的无功电流。

5 系统控制策略仿真及分析

为验证 LVRT 控制策略的有效性, 本文基于

PSCAD/EMTDC 平台建立双馈感应发电系统仿真模型。1) DFIG 仿真参数: DFIG 的额定功率为 2 MW; 定子侧额定电压为 690 V; 额定频率为 50 Hz; 定子电阻、漏感为 0.005 4 p.u.、0.10 p.u.; 转子电阻、漏感为 0.006 07 p.u.、0.11 p.u., 激磁电感(互感)为 4.5 p.u.; 转动惯量为 0.089 2 kg·m²; 极对数为 2。2) 变流器参数: 直流母线电压给定定为 800 V; PWM 开关频率为 5 kHz; 直流侧卸荷电阻为 0.4 Ω; 直流侧电容为 7 800 μF; DFIG 定子侧额定电压为 690 V, 通过变压器并到 20 kV 的强电网上, 以上参数均归算定子侧。

5.1 电网电压发生三相短路故障仿真分析

7 s 时候风机并网点处发生三相短路故障, 电网电压跌落到 0.2 p.u., 故障持续时间为 0.2 s, 故障发生前双馈发电机组稳定运行在超同步状态, 即电机转速为 1 800 r/min、滑差为 $s = -0.2$, 在原有控制策略下无任何保护的 DFIG 响应如图 5 所示。

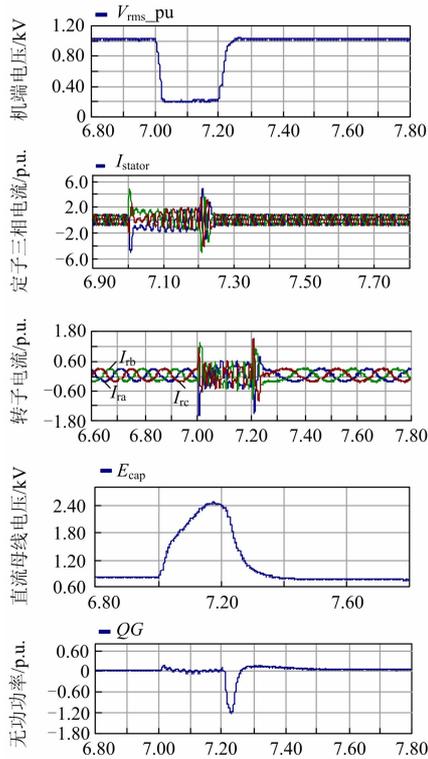


图 5 发生三相短路故障无任何保护的DFIG的响应曲线

Fig. 5 Response curves without any protection of DFIG

从图 5 可以看出, 在并网点电压跌落和恢复瞬间, 定、转子各相电流可达到正常情况的 4~5 倍, 长时间这样会对转子侧变流器造成损坏; 直流母线电压达到了恒定值的 3 倍, 远远超出变流器和直流母线电容器的承受范围。当并网点电压恢复时, DFIG 发电系统从电网中吸收了 1.2 p.u. 的无功功

率, 不利于机端电压的恢复。

5.2 低电压穿越控制策略仿真分析

由于变流器的耐压能力有限, 其直流侧电压一般不允许超过额定电压水平的 10%~15%, 由参数可得 $U_{rmax} = \frac{800}{690\sqrt{2}}(1+10\%) = 0.9$ p.u., 并将双馈发电机组参数代入式(28), 可得 Crowbar 电路电阻最大值为 0.21 p.u., 再根据机侧变流器电流、转子电流以及直流母线电压的波形效果取 $R_{cb} = 0.18$ p.u., 直流侧卸荷电路电阻 $R = 0.2$ p.u.。当转子电流衰减到稳态时即 7.15 s 时 Crowbar 电路退出。

5.2.1 原有控制策略电压跌落时加入 Crowbar 电路和直流卸荷电路

由图 6 可知当检测到转子电流超过 0.6 p.u. 接入 Crowbar 电路, 定子侧的电流最大值很快衰减到了 0.5 p.u., 转子侧电流也经过 0.05 s 最大值衰减到了

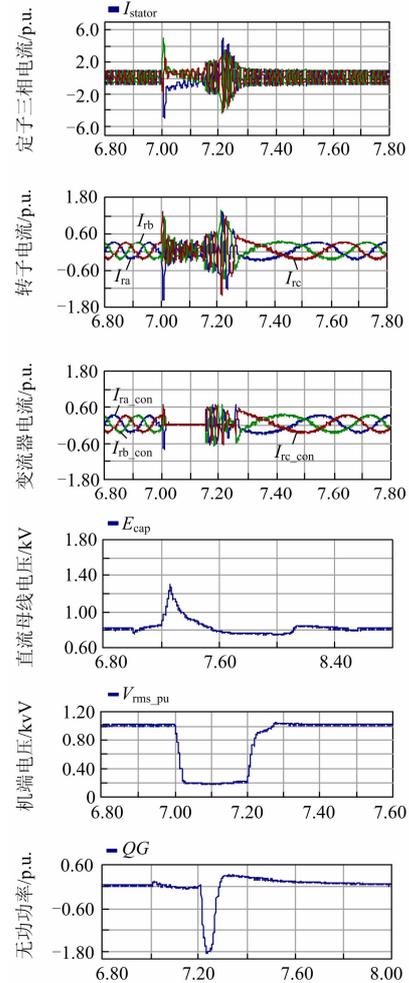


图 6 发生三相短路故障有Crowbar电路和直流卸荷电路的DFIG的响应曲线

Fig. 6 Response curves for a voltage dip with the Crowbar circuit and DC-chopper circuit of DFIG

0.3 p.u.。接入Crowbar电路后转子侧的电流立即流入Crowbar电路,从而对变流器得到了很好的保护,在并网点电压恢复时暂态电流也得到抑制,直流母线电压的波动幅度也最大在0.1 kV,使其在可以接受的范围内;由于在电压恢复时Crowbar电路再次切入,使得Crowbar电路从电网吸收更多的无功功率,不利于机端电压的恢复,也将延迟风力发电系统恢复稳定。

若仅有Crowbar电路而无直流卸荷电路的加入如图7所示。

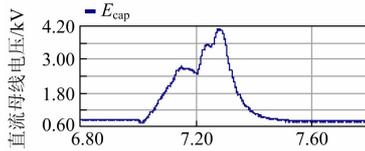


图7 没有加入直流卸荷电路

Fig. 7 Without DC-chopper circuit

由图7可知由于故障恢复期间Crowbar电路的再次切入使直流母线电压值波动更大,与图6采用直流侧卸荷电路对比知道,直流侧卸荷电路能够直接有效地抑制直流母线电压的大幅波动,也可以让Crowbar电路中的电阻值在一定范围内选取较大的值,抑制转子侧变流器的过电流,从而保护转子侧变流器。

5.2.2 新的控制策略下无功功率特性分析

对比图5和图6可知,在原有网侧变流器控制策略下由于在电压恢复时Crowbar电路再次切入,使得Crowbar电路从电网吸收无功功率达到1.8 p.u.,采用本文提出的无功功率控制策略,仿真结果如图8所示。

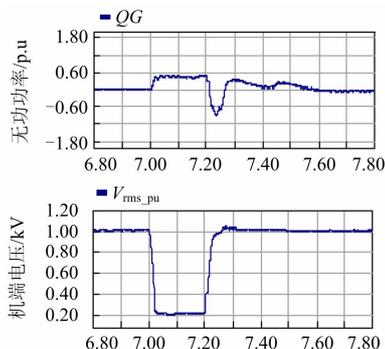


图8 发生三相短路故障DFIG发送的无功功率和机端电压

Fig. 8 DFIG reactive power transmission and terminal voltage during a voltage dip

由图8可看出发生三相短路故障后系统向电网发出其最大无功功率约0.4 p.u.,符合LVRT要求的无

功功率。故障排除后在机端电压恢复过程中,Crowbar电路从电网吸收的无功功率也只有0.6 p.u.,7.25 s时机端电压恢复,系统继续运行在单位功率因数模式,整个系统无功功率经过0.3 s恢复到0。

5.2.3 新的控制策略下有功功率特性分析

根据能量守恒定律知道

$$PG = P_{g1} + P_s \quad (31)$$

式中, PG 、 P_{g1} 、 P_s 分别是风机流入电网的有功功率、网侧变流器流出的有功功率、定子端流出的有功功率。

由图9可以看出,Crowbar电路切入后使双馈异步电机成为一台具有大转子电阻,导致网侧变流器流入电网的有功功率倒流,而定子侧由于故障使得输入电网的有功功率减小到0 p.u.左右,最终导致输入电网的有功功率倒流。故障结束后,由于Crowbar电路的切入和电磁耦合作用限制(定子绕组侧电压无法随电网电压同步恢复),这也加深造成了双馈发电机在故障切除瞬间产生功率倒送现象(峰值为-4 p.u.),并经过240 ms的快速振荡恢复至稳定值。

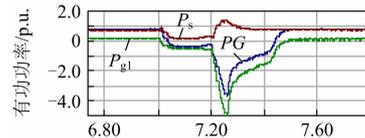


图9 发生三相短路故障时系统有功功率

Fig. 9 System active power transmission during a voltage dip

6 结语

本文分析了电网电压跌落以及电网电压恢复情况下的运行状况,在文献[9]的基础上,采用直流母线电容器两侧并联卸荷电阻和Active Crowbar电路两者的结合设计实现LVRT,并针对Crowbar电路两次切入的暂态响应提出了一种网侧变换器无功功率控制策略。基于2 MW的DFIG模型,进行了LVRT及所提出的控制策略的仿真研究,结果表明:直流侧卸荷电路能够直接有效地抑制直流母线电压过电压,同时也可以让Crowbar电路中的电阻值在一定范围内选取较大的值,降低仅有Crowbar电路时电阻选取大小的难度,使得实现LVRT更直接有效方便;并且通过Crowbar电路的再次切入控制策略,延长了系统暂态恢复,定子绕组侧电压无法随电网电压同步恢复,利用风机机端电压偏差值来确定无功功率基准值,不仅能为电网提供足够的无功功率帮助电网恢复,同时也能在故障切除后向系统继续发出无功功率来加快风机机端电压恢复,该控制策略相对简单,具有较好的实用价值。

参考文献

- [1] 苏平, 张靠社. 基于主动式IGBT型Crowbar的双馈风力发电系统LVRT仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 164-170.
SU Ping, ZHANG Kaoshe. Simulation research for LVRT of DFIG with active IGBT cowbar[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 164-170.
- [2] MOHSENI M, ISLAM S, MASOUM M. Fault ride-through capability enhancement of doubly-fed induction wind generators[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(5): 368-376.
- [3] YANG L H, XU Z, ØSTERGAARD J, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 713-722.
- [4] LI Huiyang, ZHAO Xu, ØSTERGAARD J, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 713-721.
- [5] 郑重, 杨耕, 耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 7-14.
ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. The short-circuit current analysis of DFIG wind turbines with crowbar protection under grid failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 7-14.
- [6] YANG Lihui, XU Zhao, ØSTERGAARD J, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 713-721.
- [7] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
HE Yikang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [8] 李东东, 叶辰升. 基于改进风力发电机组下的低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 34-40.
LI Dongdong, YE Chensheng. Control strategy research of low voltage ride through based on the improved wind turbine generator system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 34-40.
- [9] 朱颖, 李建林, 赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 20-24.
ZHU Ying, LI Jianlin, ZHAO Bin. Low voltage ride through control strategy simulation of DFIG wind turbines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 20-24.
- [10] 梁亮, 李建林, 许洪华. 电网故障下双馈感应式风力发电系统的无功功率控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 70-73.
LIANG Liang, LI Jianlin, XU Honghua. Reactive power control strategy for doubly-fed induction wind power generation system under fault in power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 70-73.
- [11] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 87-92.
JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 87-92.
- [12] 国家电网公司. 国家电网公司风电场接入电网技术规定(修订版)[S]. 北京: 国家电网公司, 2009.
State Grid Corporation of China. State Grid Corporation of China wind farms connected to the grid technical regulations (revised edition)[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2009.
- [13] 郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈感应风力发电机低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-48.
GUO Jiahu, ZHANG Luhua, CAI Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-48.
- [14] 张禄, 金新民, 唐芬. 电网电压对称跌落下的双馈感应发电机PI-R控制及改进[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 106-114.
ZHANG Lu, JIN Xinmin, TANG Fen. Improved PI-R control for doubly fed induction generators under grid voltage symmetrical dip[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 106-114.
- [15] VRIONIS T D, KOUTIVA X I, VOVOS N A. A genetic algorithm-based low voltage ride-through control strategy for grid connected doubly fed induction wind

- generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1325-1333.
- [16] 黎芹, 张兴, 杨淑英, 等. 双馈风力发电机低电压穿越转子动态过程分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5): 19-23.
LI Qin, ZHANG Xing, YANG Shuying, et al. Dynamic behavior of DFIG rotor during low voltage ride-through[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2010, 22(5): 19-23.
- [17] 翟佳俊, 张步涵, 谢光龙. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 18-22.
ZHAI Jiajun, ZHANG Buhuan, XIE Guanglong. The three phase short-circuit current property of DFIG wind turbines with crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 18-22.
- [18] MORREN J, DE 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.
- [19] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 38(6): 40-44.
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 38(6): 40-44.
- [20] 丁明, 胡腾华, 韩平平, 等. 基于Crowbar的双馈风机LVRT特性研究[J]. 合肥工业大学学报, 2013, 36(4): 410-415.
DING Ming, HU Tenghua, HAN Pingping, et al. Study of LVRT ability of DFIG wind turbine based on Crowbar[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2013, 36(4): 410-415.

收稿日期: 2014-11-13; 修回日期: 2015-03-31

作者简介:

赵霞(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事电网稳定运行与规划的研究; E-mail: axia_zhao@163.com

王倩(1962-), 女, 教授, 研究方向为电网运行与稳定、智能监控技术, 调度综合自动化、配电网自动化; E-mail: qian.wang@swjtu.edu.cn

邵彬(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能配电网自愈控制。E-mail: shaobingood@163.com

(编辑 姜新丽)