

双馈风电机组低/高电压复合穿越的控制策略研究

严雨豪¹,周步祥¹,陈实¹,董申¹,刘治凡²,臧天磊¹

(1. 四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;

2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:目前研究双馈风电机组(DFIG)高电压穿越的重点是单次高压型故障,然而DFIG低电压穿越后,由于无功补偿策略的不合理性,会引发低\高电压复合型故障,对电压二次骤升的暂态分析造成一定影响。因此,在低压恢复阶段的前提下,对电压二次骤升下的转子电流公式进行合理推导,并提出一种转子过电流抑制策略。然后基于故障穿越时系统的无功需求,改进网侧变流器的控制策略。该策略一方面能够减少撬棒保护的投切频率,在一定程度上避免转子侧换流器旁路造成的不可控性;另一方面能够最大限度地向机组给予无功支持,保持直流母线电压处于稳定状态,提升高电压穿越的可靠性。

关键词:双馈风电机组;低/高电压穿越;低压恢复阶段;撬棒电路;转子过电流抑制

中图分类号:TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22729

Rsearch on Control Strategy for Doubly Fed Induction Generator Under Low/High Voltage Ride Through

YAN Yuhao¹, ZHOU Buxiang¹, CHEN Shi¹, DONG Shen¹, LIU Zhifan², ZANG Tianlei¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: At present, the focus of research on doubly fed induction generator (DFIG) high voltage ride through is a single high voltage fault. However, after DFIG low voltage ride through, due to the irrationality of the reactive power compensation strategy, a low/high voltage compound fault have be caused, which have a certain impact on the transient analysis of the secondary voltage surge. Therefore, the rotor current formula was reasonably derived under the second voltage surge on the premise of the low voltage recovery stage, and a rotor over-current suppression strategy was proposed. Then, based on the reactive power demand of the system during fault ride through, the control strategy of the grid-side converter was improved. On the one hand, the strategy can reduce the switching frequency of crowbar protection, and to a certain extent avoid the uncontrollability caused by the bypass of the rotor-side converter. On the other hand, it can provide maximum reactive power support to the unit, keep the DC bus voltage in a stable state, and improve the reliability of high voltage ride through.

Key words: doubly fed induction generator(DFIG); low/high voltage ride through; low voltage recovery stage; crowbar circuit; rotor over-current suppression

随着并网风电系统中双馈风电机组(doubly fed induction generator, DFIG)装机容量的不断增加,人们开始逐渐关注DFIG的运行状态对系统的影响^[1-2]。目前,关于风电低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)性能的研究已日益成熟。

相比之下,DFIG高电压穿越(high voltage ride through, HVRT)还有诸多相关问题亟待解决^[3]。现阶段有关HVRT的问题极大多数是围绕大型负荷瞬间切除或大容量电容设备投入引发的单次高压型故障,然而,电网电压二次骤升故障多发

基金项目:四川省科技计划项目(2020JDR0049)

作者简介:严雨豪(1995—),男,硕士,Email:406247096@qq.com

通讯作者:陈实(1977—),男,副教授,Email:563757203@qq.com

生于LVRT之后的恢复阶段,这是由于无功补偿装置未能及时退出等原因致使系统无功过剩所致。因此,为防止电网电压骤升时DFIG出现大面积脱网事故,需重点研究LVRT恢复阶段对机组HVRT的影响。

在单次电压骤升下对DFIG的研究主要有两种方法:1)当电网受到小扰动时,通过改进控制方案提升风电机组变流器的控制能力;2)当电网受到大扰动时,通过附加硬件电路保证机组在故障期间继续并网运行。文献[4-5]分别采用转子侧串联阻容与转子侧串联限流电阻的技术来改善机组HVRT性能;文献[6-7]对转子侧变流器(rotor-side converter, RSC)与网侧变流器(grid-side converter, GSC)的控制策略进行改进,从而抑制机组高电压故障穿越期间的过电流,实现机组的HVRT。上述文献都以不同的切入点对DFIG的暂态特性进行了研究,并提出相应的优化方案,但是没有对HVRT期间暂态过程进行精确分析。考虑到机组对无功补偿的需求,文献[8-9]在电网电压骤升过程中,采用静止无功补偿装置吸收多余无功功率,维持母线电压的稳定进而完成机组HVRT。但是,该方法增加了设备投资,降低了经济效益。

针对DFIG低/高压连锁故障的研究中,文献[10]提出了一种适用于LVRT和HVRT的变流器协同控制算法,通过仿真验证了该协同控制算法的故障穿越能力。文献[11]提出一种新型自适应撬棒控制方法,利用动态撬棒阻值同时兼顾了DFIG转子电流与直流母线电压的抑制问题,但文献[10-11]均未涉及对低压恢复阶段的分析。

截止目前,低压恢复阶段会影响机组HVRT性能这一结论已在相关文献中得到验证。文献[12]分析了风机LVRT期间及低压恢复阶段的有功/无功输出特性,指出了低压恢复阶段对于机组并网点电压骤升的影响。文献[13]建立了考虑低压恢复阶段的DFIG暂态模型,重点分析定子自由分量,研究多种故障参数对DFIG高电压故障穿越性能的影响,然而上述研究并未针对二次电压骤升情况制定相应的DFIG故障穿越策略。文献[14]在考虑低压恢复阶段的前提下得到了机组HVRT期间撬棒电阻的最优阻值,但此方法在电网电压非严重骤升时无法充分调动机组无功支持能力。

基于此,本文在考虑低压恢复阶段的前提下,对电网电压二次骤升时的转子电流公式进行推导。在不增添硬件设备情况下,提出转子过电流抑制策略并加入到转子侧完成控制功能。然后对GSC的控制方式进行调节,从而在最大程度减小HVRT期间转子过电流的同时避免了撬棒电路频繁投切,还能充分调动机组无功支持能力,提升DFIG高电压穿越性能。

1 DFIG低/高压复合型故障的暂态过程分析

1.1 DFIG低/高压复合故障全过程

通过文献[2-3]中风电机组未成功实现HVRT而引起风机脱网事故的分析可知,发生低电压故障之后并网点的电压会出现快速上升的现象。在低电压故障恢复过程中,补偿装置与具备LVRT功能的风电机组会向电网给予无功支持,若投入的无功补偿装置不能及时撤出,将导致系统无功过剩,从而并网点电压迅速增大,形成低/高电压复合故障。图1为发生DFIG低/高压复合故障下的电压波形。

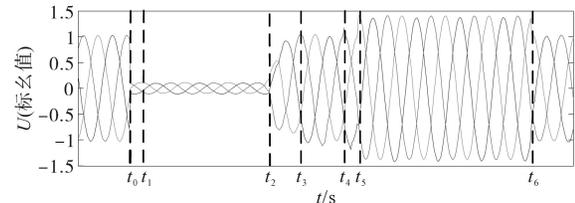


图1 DFIG低/高压复合故障下的电压波形图

Fig.1 Voltage waveforms of DFIG under low/high voltage composite fault

由图1可知:电网电压在 t_0 时刻出现跌落,该幅值由 p 表示,此刻撬棒电路投入保护; t_1 时刻撬棒电路断开,DFIG在低压情况下稳定运行; t_2 时刻在故障保护装置的作用下完成低压穿越过程使其电压开始逐渐恢复,并且在 t_3 时刻电压恢复到故障前水平;然而,由于控制功能的滞后性,在低压故障穿越时无功补偿装置不能立即撤出,将引起风电场无功过剩从而导致 t_4 时刻并网点电压抬升,此次骤升幅度用 m 表示,假如转子电流高于规定限值,要迅速连接撬棒电路实施保护,于 t_5 时刻将其切除,DFIG在经过HVRT后于 t_6 时刻恢复正常稳态运行。

首先,在不计磁饱和现象的基础上,利用以定子坐标系为基础的空间矢量坐标系,对DFIG的数学模型进行分析,具体如下:

$$u_s^s = i_s^s R_s + \frac{d\Psi_s^s}{dt} \quad (1)$$

$$u_r^s = i_r^s R_r + \frac{d\Psi_r^s}{dt} + j\omega_r \Psi_r^s \quad (2)$$

$$\Psi_s^s = L_s i_s^s + L_m i_r^s \quad (3)$$

$$\Psi_r^s = L_r i_r^s + L_m i_s^s \quad (4)$$

式中: u_s^s 为定子电压; i_s^s 为定子电流; Ψ_s^s 为定子总磁链; u_r^s 为转子电压; i_r^s 为转子电流; Ψ_r^s 为转子磁链; L_s 为定子全电感; R_s 为定子电阻; L_r 为转子全电感; R_r 为转子电阻; L_m 为励磁电感; ω_r 为转子转速。

由于 MW 级 DFIG 可忽略定子电阻, 则由式(1)可以得到 DFIG 在稳态运行状态下的定子总磁链为

$$\Psi_s^s = \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j\omega_0 t} \quad (5)$$

式中: Ψ_s^s 为定子总磁链, 是由故障穿越过程中同步角速度旋转形成的强制分量 Ψ_{sf}^s 与定子时间常数衰减形成的自由分量 Ψ_{sn}^s 相结合而成; U_s 为定子电压; ω_0 为同步旋转角速度。

假如电网在 $t = t_0$ 时刻出现变化, 可得到如下的定子自由分量:

$$\Psi_{sn}^s(t) = \Psi_{sn}^s(t_0) e^{\frac{t-t_0}{\tau_s}} \quad (6)$$

其中
$$\tau_s = \frac{\sigma L_s}{R_s} \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

式中: τ_s 为暂态定子时间常数; σ 为漏感系数。

当忽略电压跌落恢复阶段 $t_3 - t_4$ 会直接影响磁链自由分量, m 表示本次电压骤升幅度, 则根据磁链守恒定律可知 t_4 时刻的定子自由磁链分量为

$$\Psi_{sn}^s(t_4) = \Psi_s^s(t_4) - \Psi_{sf}^s(t_4) = \frac{U_s}{j\omega_0} - \frac{(1+m)U_s}{j\omega_0} = -\frac{U_s}{j\omega_0} \quad (7)$$

通过式(7)计算可得, 定子自由磁链分量值仅与骤升幅度 m 有关联, 与电网电压跌落恢复无关。通过分析图 1 可知, 大部分电压骤升现象是在恢复电压跌落(t_3 时刻)后。因此, 电压正常至骤升发生时刻的间歇时间 $T_r = t_4 - t_3$, 与此同时恢复电压电网故障角度 θ 、电网电压跌落深度 p 等因素都对定子磁链自由分量产生影响。则有:

$$\Psi_{sn}^s(t_4) = f(m, p, T_r, \theta, \dots) \quad (8)$$

1.2 电网电压二次骤升时 DFIG 转子电流

基于文献[14]中第 2 章的推导过程, 设 t_4 时刻为电网电压二次骤升初始时刻, 那么电网电压二

次骤升时 DFIG 转子、定子总磁链由下式表示:

$$\begin{aligned} \Psi_s^s(t) &= \Psi_{sf}^s(0_+) e^{j\omega_0 t} + \Psi_{sn}^s(0_+) e^{-\frac{t}{\tau_s}} \\ &= \frac{(1+m)U_s}{j\omega_0} e^{j\omega_0 t} + \\ &\quad \frac{U_s}{\omega_0} (\sqrt{2} p \cos\theta e^{j\frac{\pi}{4}} e^{\frac{T_r}{\tau_s}} + m e^{j(\omega_r T_r + \theta + \frac{\pi}{2})}) e^{-\frac{t}{\tau_s}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Psi_r^s(t) &= \Psi_s^s(0_+) + A \Psi_{sn}^s(0_+) e^{-\frac{t}{\tau_r}} + \\ &\quad B \Psi_{sf}^s(0_+) e^{j\omega_0 t} + C_1 e^{-\frac{t}{\tau_r}} e^{j\omega_0 t} \end{aligned} \quad (10)$$

其中
$$\tau_r = \frac{\sigma L_r}{R_r} \quad A = \frac{1}{1 - j\omega_r \tau_r} \quad B = \frac{1-s}{(1 - j\omega_r \tau_r)s}$$

$$C_1 = \Psi_r(0_-) - A \Psi_{sn}(0_+) - B \Psi_{sf}(0_+) - \Psi_s(0_+)$$

$$s = (\omega_0 - \omega_r) / \omega_0$$

式中: τ_r 为暂态转子时间常数。

联立式(3)、式(4)可得:

$$i_r = \frac{1}{L_r'} (\Psi_r - \Psi_s) \quad (11)$$

其中
$$L_r' = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s}$$

将式(9)和式(10)代入式(11)中可以得到二次骤升时转子电流表达式为

$$\begin{aligned} i_r &= \frac{1}{L_r'} [(A-1)\Psi_{sn}(0_+) e^{-\frac{t}{\tau_r}} + (B-1)\Psi_{sf}(0_+) e^{j\omega_0 t} + \\ &\quad \Psi_s(0_+) + C_1 e^{-\frac{t}{\tau_r}} e^{j\omega_0 t}] \end{aligned} \quad (12)$$

为了简化 2.2 节中 GSC 改进控制策略的分析过程, 本文采用控制变量法, 以电网电压二次骤升幅度 m 为变量, 考虑第一次电网电压跌落最严重的故障情况。并由文献[13-15]可知: 单次低压穿越故障的电压跌落深度范围大部分处于 0.5~0.8(标么值)之间, 电网电压恢复阶段时间为 0.5~2 s, 分布系统中故障恢复角度的取值为 45°~60°。

下面, 取 $p=0.8$ (标么值), $T_r=0.5$ s, $\theta=60^\circ$, $\omega_0 T_r + \theta + \frac{\pi}{4} = 2k\pi$ ($k=0, 1, 2, \dots$), 即取定子自由磁链分量初始值为最高峰值。代入式(12)即可得到电网电压二次骤升时转子电流最大值 i_{\max} , 表达式为

$$i_{\max} = \frac{U_s}{L_r' \omega_0} [(e^{-\frac{1}{2\tau_r}} - 1)(0.4\sqrt{2} e^{\frac{1}{2\tau_r}} + m) + (e^{\frac{j\omega_0}{2}} - 1)(1+m)] \quad (13)$$

利用最大电流幅值 i_{\max} 与 DFIG 正常运行时

的电流幅值 $i_r(0_-)$ 设计转子过电流抑制控制器, K 值计算式为

$$K = \frac{i_r(0_-)}{i_{\max}} \quad (14)$$

2 电网电压二次骤升故障下DFIG控制策略

2.1 转子过电流抑制策略

假设在电网电压二次骤升阶段仅使用撬棒电路进行保护,且撬棒电路启动阈值设定为2(标么值),由式(13)可计算出撬棒保护投入时刻电压骤升幅度为

$$\frac{U_s}{L_r \omega_0} [(e^{\frac{1}{2\tau}} - 1)(0.4\sqrt{2} e^{\frac{1}{2\tau}} + m) + (e^{\frac{j\omega_0}{2}} - 1)(1 + m)] > 2 \quad (15)$$

由式(15)计算可得: $m > 0.12$, 表示电压骤升幅度高出额定电压12%的条件下,则立刻启用撬棒电路。

基于低压恢复阶段的电网电压二次骤升暂态分析及对转子电流的影响,在传统的RSC控制策略中加入转子过电流抑制控制器。利用RSC解耦控制DFIG的无功分量与有功分量,即控制转子电流闭环控制系统上的 q 分量与 d 转子电流,达到调节DFIG无功与有功输出的作用。图2为DFIG的RSC控制框图。

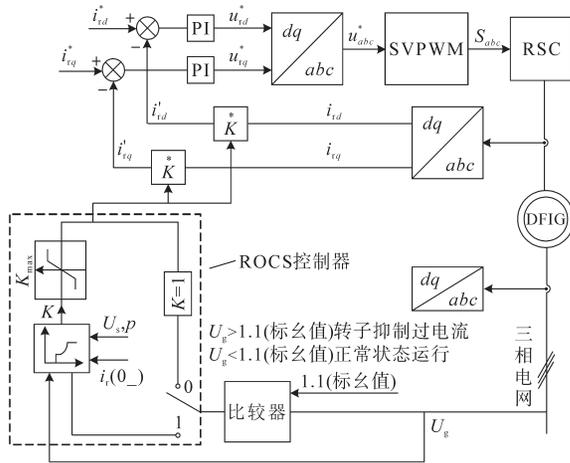


图2 DFIG的RSC控制框图

Fig.2 RSC control block diagram of DFIG

设定DFIG处于正常运行状态或电网电压受到小扰动,即 $U_g < 1.1$ (标么值)时,经过比较器将信号输出至转子过电流抑制控制器,使其工作在模式0状态下,输出 $K=1$,RSC与GSC分别进行最大风能追踪及单位功率因数控制。电网电压二次骤升检测结果显示 U_g 的值高于1.1(标么值),

此时需将转子过电流控制器的模式转换为模式1,再向转子过电流抑制控制器中输入骤升幅度 m 、定子电压 U_s 、二次骤升电压前 $i_r(0_-)$ 转子电流瞬时值,进而输出 K 值,并根据限幅环节对 K 值进行整定,防止超过RCS的功率调节容量,使RCS在二次骤升期间输出的有功、无功转子电流指令值均在正常范围内,从而有效抑制HVRT期间转子过电流对系统的冲击。

在电网电压发生二次骤升故障时,RSC中转子过电流抑制控制器会根据并网点电压不同变化情况,切换对应工作模式,通过抑制转子过电流大小减轻对系统的冲击,并且避免撬棒电路的频繁投入,增强了机组自身的无功支撑能力。

2.2 GSC改进控制策略

电网电压发生二次骤升故障时,若转子电流上升至撬棒电路启动阈值,DFIG将在异步电机模式下运行,无法有效控制RSC旁路。若此时GSC受单位功率因数限制,难以向系统给予所需的无功支持。则需对GSC控制策略进行改进,保证在DFIG异步运行期间尽可能提供无功支持,同时维持直流母线电压的稳定。

电网电压超过限定值1.1(标么值)时,GSC不再以单位功率因数模式运行,而是通过无功补偿指令值充分为系统提供无功支持,并将前馈补偿项加入到GSC电压外环控制上,从而可降低电网电压骤升后对直流母线电压稳定性的影响。若不计算线路与开关产生的损耗,即可得出直流母线电压 U_{dc} 与电网输出GSC的有功功率 P_g 之间的关系^[16]:

$$U_{dc} C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_g - U_{dc} i_{rdc} \quad (16)$$

式中: C_{dc} 为DC-link电容器值; i_{rdc} 为转子侧直流电流。

由于GSC在电网电压定向矢量控制下,那么:

$$U_{dc} C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} U_s i_{gd} - U_{dc} i_{rdc} \quad (17)$$

假设 $\frac{dU_{dc}}{dt} = 0$, 可确保直流母线电压在某个区间内保持稳定且期间不高于安全阈值,那么式(17)可改为

$$i_{gd} = \frac{2U_{dc} i_{rdc}}{3U_s} \quad (18)$$

因此,将前馈分量 i_{gd} 加入到GSC外环输出

上,从而减小注入DC-link 电容的瞬态电流值,以此来保持直流母线电压的相对稳定。图3为DFIG的GSC改进控制策略图。

GSC外环电网电压控制策略在为DFIG提供无功补偿的同时,通过附加前馈补偿项改变电流内环控制的参考值达到稳定母线电压的目的。此策略经济有效,控制简单,同时也减少了直流侧卸荷电路的投入次数,为DFIG在电网电压二次骤升故障穿越提供了保障。

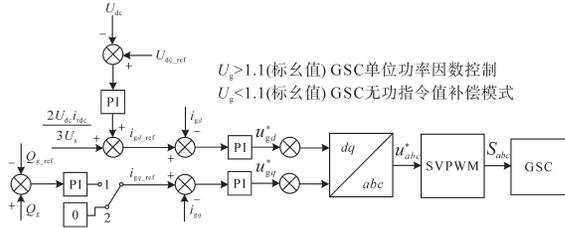


图3 DFIG的GSC改进控制策略

Fig.3 Improved control strategy of DFIG grid-side converter

2.3 DFIG 高压故障穿越控制步骤

将电网电压骤降恢复过程考虑在内,进一步分析电网电压二次骤升时RSC与GSC的控制过程,通过调整使DFIG在电压二次骤升期间抑制转子过电流的同时充分调动无功支撑能力。图4为DFIG高电压故障穿越控制流程图。

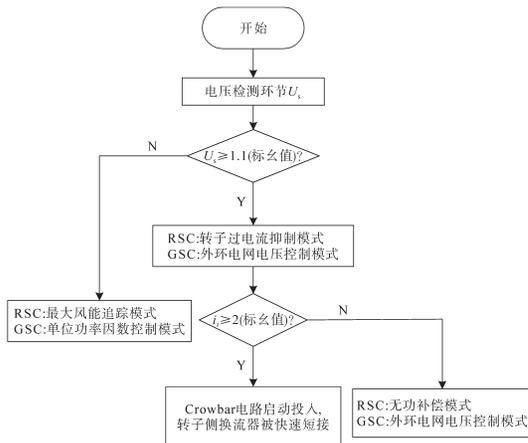


图4 DFIG控制步骤图

Fig.4 DFIG control step

DFIG 高电压故障穿越控制步骤如下:

1)首先通过电压测量环节检测电网电压 U_g , 判断其幅值是否在本文设定正常范围 1.1(标么值)之内。

2)若 $U_g < 1.1$ (标么值), 则 RSC, GSC 分别以最大风能追踪模式和单位功率因数控制模式运行;若 $U_g > 1.1$ (标么值), GSC 侧切换为外环电网电压控制模式, 而 RSC 侧切换为转子过电流抑制模式运行。成功抑制转子电流后, GSC 和 RSC 可

充分发挥自身无功补偿作用,提供感性无功协助电网电压在短时间内迅速恢复正常状态。

3)电网电压骤升后,如果经RSC转子过电流抑制调节后,转子电流仍然比撬棒电路上的驱动阈值高,则RSC被迫短接,撬棒电路立刻投入保护,此时GSC仍可在维持母线电压稳定基础上通过无功指定值向电网输出感性无功。

根据上述控制流程,在电网电压二次骤升过程中,一方面DFIG采用转子过电流抑制器减小过电流,同时调动GSC,通过发送无功功率,从而对电网电压起到支撑作用;另一方面电压出现骤升故障后对转子过电流起到一定抑制作用,导致撬棒投入降低。

3 仿真分析

本节通过在PSCAD平台上搭建DFIG转子侧与网侧改进后的仿真模型,对暂态过程进行仿真分析。DFIG的参数如表1所示,各故障参数与前文默认参数保持一致。

表1 DFIG基本参数

Tab.1 Basic parameters of DFIG

参数	数值
额定功率 P_N	1.5 MW
定子侧额定电压 U_N	690 V
系统频率 f	50 Hz
转子自感 L_r	3.176(标么值)
定子自感 L_s	3.161(标么值)
转子互感	3.1(标么值)
定子电阻 R_s	0.002 5(标么值)
转子电阻 R_r	0.001 9(标么值)
极对数	2

3.1 低压恢复阶段及运行参数对HRVT影响验证

为深入揭示运行参数中 风速、转子转速对 HVRT 的影响,以额定频率下的同步旋转速度为基准值,风速 v_w 为 7.0~12.0 m/s 时相对应的转子转速标么值 ω_r 为 0.7~1.2^[17]。由于故障穿越期间,暂态过程时间较短,本文仅考虑恒定风速对 HRVT 性能的影响。表 2 给出了当风速 v_w 为 8.0 m/s 和 12.0 m/s 时与之对应转子转速 ω_r 、转差率 s 的标么值。

因此,为验证低压恢复阶段及运行参数对 DFIG 高电压故障穿越的影响,图 5 给出了机组分别运行于超同步 ($s=-0.2$) 与欠同步 ($s=0.2$) 工况时,在不同骤升程度下,发生单次电网电压骤升与二次骤升(本文仅考虑最严重电压跌落情况)的转子电流峰值仿真对比结果。

表2 DFIG 不同运行工况下参数值

Tab.2 DFIG parameter values under different operating conditions

$v_w/(m \cdot s^{-1})$	ω_r (标么值)	s (标么值)
8.0	0.8	0.2
12.0	1.2	-0.2

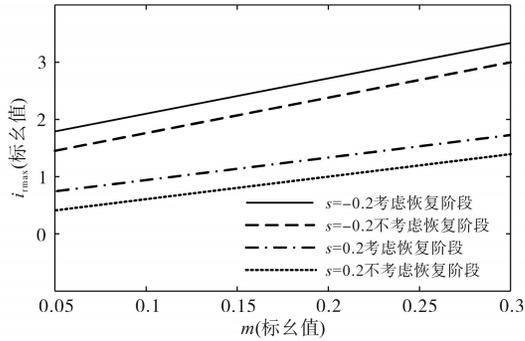


图5 转子电流峰值对比

Fig.5 Rotor current peak comparison

从图5中可以看出,在不同电压骤升幅度下,考虑低压恢复阶段的转子电流峰值明显大于单次高电压穿越时的峰值,即是否考虑低压恢复过程关系到高电压穿越故障期间暂态分析的精准性。若忽略低压恢复阶段,则故障保护装置可能误动,导致DFIG高压故障穿越失败。可见,低压恢复阶段相当重要,分析机组HVRT过程不可忽略低压恢复阶段。同样,从图5中可见,在相同电压骤升幅度下,机组故障前不同的运行工况也会对DFIG的瞬态响应产生影响。双馈风电机组在HRVT期间,超同步($s=-0.2$)运行下转子电流峰值明显高于欠同步($s=0.2$)运行下的转子电流峰值,进而说明超同步工况下更加威胁机组的稳定运行。

3.2 改进控制策略有效性验证

设置机组故障前转速为1.2(标么值), $t=2.5$ s时电网电压发生二次骤升故障,故障持续时间为0.5 s。当骤升幅度 $m=0.2$ (标么值)时,电网电压受到小扰动,采用本文策略控制前后的仿真结果如图6所示。

由图6a、图6b可知,在转子过电流抑制控制器的作用下,故障期间DFIG转子电流峰值明显降低,过电流得到有效的抑制。图6c、图6d表示直流母线在控制前后的电压幅值情况,本文策略将前馈补偿量添加到GSC,使得直流母线电压波动幅度明显下降,且降至安全范围内。图6e、图6f表示控制前后撬棒电路投切情况。其中,纵坐标1表示转子电流高于撬棒启动阈值,撬棒电路可迅速进行保护;0表示转子电流比设定启动阈值低,需要迅速去除撬棒电路。根据该图,电网电压扰动

较小的情况下,采用本文策略可减少撬棒电路投切次数,电网电压二次骤升过程中RSC可以向电网提供感性无功,有利于快速恢复电网电压。

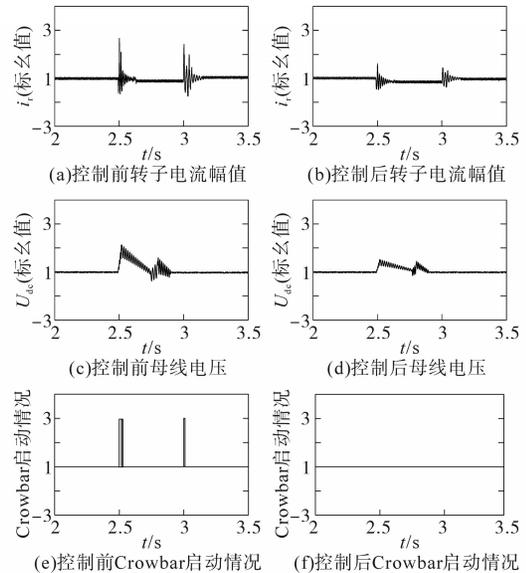


图6 电网电压二次骤升至1.2(标么值)时DFIG仿真结果

Fig.6 Simulation results of the DFIG for secondary grid voltage swell to 1.2

当骤升幅度 $m=0.3$ (标么值)时,电网电压二次深度骤升,采用本文策略控制前后的仿真结果如图7所示。

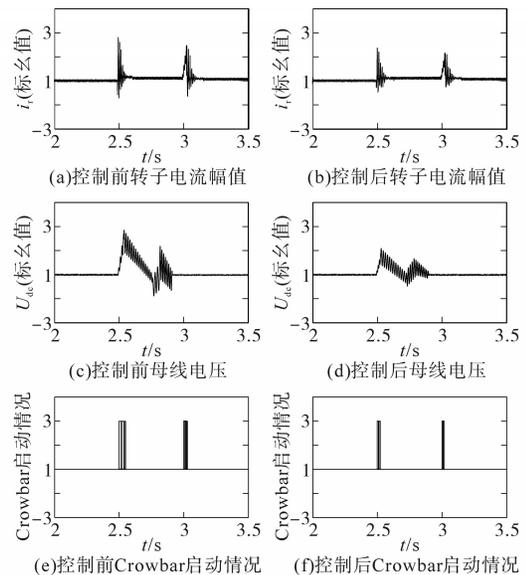


图7 电网电压二次骤升至1.3(标么值)时DFIG仿真结果

Fig.7 Simulation results of the DFIG for secondary grid voltage swell to 1.3

由图7a、图7b可知,当电网电压二次严重骤升时,本文策略仍然保持了对转子过电流抑制的有效性,尽可能降低了转子过电流对RSC的冲击。由图7c、图7d可知,采用本文策略后可有效抑制直流母线电压的波动幅度,但深度骤升时,

母线电压仍会超出其安全范围。由图7e、图7f可知,转子电流在本文策略控制下依然超过了撬棒电路启动阈值,使得撬棒保护立刻投入以便保护RSC。但采用本文控制策略后,撬棒电路在电网电压二次深度骤升期间投入频率明显降低。

以上结果表明:在电网电压受到小扰动情况下,本文控制策略能够将转子电流、直流母线电压稳定在安全限度内,验证了策略的有效性;在电网电压二次严重骤升情况下,本文策略仍需要撬棒电路参与保护,但在一定程度上避免了撬棒电路的频繁投切,从而减少了因RSC旁路造成的不可控情况;此外,在DFIG异步运行方式期间,改进GSC能够通过优化无功指令值稳定并网点电压,有助于电网电压迅速恢复。

4 结论

本文在考虑低压恢复阶段的前提下,经过推导得到电网电压二次骤升时最大转子电流公式,并提出转子过电流抑制策略。然后基于故障穿越时系统的无功需求,改进GSC的控制策略。通过在PSCAD平台上搭建改进DFIG转子侧与网侧改进后的仿真模型,对暂态过程进行仿真分析。得出的结论如下:

1)DFIG低压恢复阶段是低/高电压连锁故障穿越研究中需要认真考虑的过程,对于HVRT期间暂态过程分析及数值整定有较大的影响。

2)本文策略可有效抑制电网电压二次骤升过程中的转子电流。当受到小扰动时,撬棒电路不需要投入;当电网电压二次严重骤升时,能够避免撬棒电路频繁投入的同时,最大程度提升RSC的无功支撑能力。

3)DFIG异步运行时改进GSC控制策略能够保持母线电压处于稳定状态,同时运用无功支持功能向系统持续提供无功功率,有利于电网电压快速恢复。

参考文献

- [1] 姜惠兰,李天鹏,吴玉璋. 双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 2062-2068.
Jiang Huilan, Li Tianpeng, Wu Yuzhang. Integrated strategy for low voltage ride through of doubly-fed induction generator[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 2062-2068.
- [2] 赵宏博,姚良忠,王伟胜,等. 大规模风电高压脱网分析及协调预防控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 43-48.
Zhao Hongbo, Yao Liangzhong, Wang Weisheng, et al. Outage analysis of large scale wind power under high voltage condition and coordinated prevention and control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 43-48.
- [3] 马伟娜,姚万业,白恺. 风力发电机组高电压穿越技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2014(8): 71-76.
Ma Weina, Yao Wanye, Bai Kai. Studies on high voltage ride through technologies in wind turbines[J]. Power System and Clean Energy, 2014(8): 71-76.
- [4] 周步祥,董申,刘舒畅,等. 基于转子串阻容的双馈风机低电压穿越能力优化[J]. 电测与仪表, 2018, 55(10): 108-115.
Zhou Buxiang, Dong Shen, Liu Shuchang, et al. Optimization of low voltage ride through capacity of DFIG based on rotor series resistor and capacitance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(10): 108-115.
- [5] 李俊杰,蒋昆,刘国平,等. 采用串联网侧变换器的双馈风电系统高电压穿越控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3037-3044.
Li Junjie, Jiang Kun, Liu Guoping, et al. High voltage ride-through control strategy of doubly-fed induction generator based wind turbines with a series grid-side converter[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3037-3044.
- [6] 邹乐,吴学光,寇龙泽,等. 电网电压对称骤升下双馈风力发电系统的改进控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1360-1367.
Zou Le, Wu Xueguang, Kou Longze, et al. Improved control strategy for a double-fed generation system under grid voltage symmetric swell[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1360-1367.
- [7] 罗少杰,朱玲. 电网电压骤升情况下双馈变流器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 123-129.
Luo Shaojie, Zhu Ling. Research on control strategy of double feed converter under grid voltage soared[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 123-129.
- [8] 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.
- [9] 唐亦敏. 基于静止无功补偿器的风电场高电压穿越研究[J]. 电气传动, 2017, 47(10): 54-58.
Tang Yimin. Study for the high-voltage ride-through of wind farms based on STATCOM[J]. Electric Drive, 2017, 47(10): 54-58.
- [10] 甄永赞,苏宁赛,李美林. 适用于高/低压穿越的双馈风机协同控制策略及其稳定技术研究[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 39-48.
Zhen Yongzan, Su Ningsai, Li Meilin. Research on doubly-fed induction generators synergetic control strategy and stability technology for high/low voltage ride through[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 39-48.