

SWITSC的双馈发电机暂态特性及 高电压穿越控制策略研究

曾皓冬,李华强,谢超

(四川大学 电气工程系,四川 成都 610000)

摘要:目前,常规双馈感应风力发电机(DFIG)的低电压穿越问题受到了广泛关注,但DFIG的高电压穿越(HVRT)问题研究甚少;且在发生定子绕组匝间短路(SWITSC)故障时,DFIG机组的HVRT问题鲜有研究。在分析SWITSC故障下的电磁特性和HVRT时的暂态特性基础上,提出一种撬棒电路和直流斩波电路相结合的HVRT控制策略。SWITSC故障的三相谐波恶化了电网电压骤升对转子侧电流和直流母线电压的影响,增加了HVRT的难度。转子侧撬棒电路和直流侧斩波电路显著提高了SWITSC故障机组的高电压穿越能力。仿真结果验证了理论分析的正确性。研究对掌握SWITSC的DFIG的动态过程具有一定的参考价值,为今后更好、更有效地研究风电机组的故障穿越提供了新的方向。

关键词:双馈感应发电机;定子绕组匝间短路;高电压穿越;暂态特性;撬棒;斩波电路

中图分类号:TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21233

Study on Transient Characteristics and High Voltage Ride Through Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator Based on SWITSC

ZENG Haodong, LI Huaqiang, XIE Chao

(Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, Sichuan, China)

Abstract: At present, the problem of LVRT of conventional doubly-fed induction generator (DFIG) has been widely concerned, but the research on the problem of high voltage ride through (HVRT) of DFIG is very deficient, and in the case of stator winding inter-turn short circuit (SWITSC), there is little research on high voltage ride through (HVRT) of DFIG units. Based on the analysis of the electromagnetic characteristics and the transient characteristics under voltage swell, a HVRT control strategy combining Crowbar circuit and DC chopper circuit was proposed. The three-phase harmonics of SWITSC fault worsen the effect of voltage swell on rotor side current and DC bus voltage, and increase the difficulty of HVRT. Rotor side Crowbar circuit and DC side chopper circuit significantly improve the high voltage ride through capability of the SWITSC fault unit. The research has a certain reference value for mastering the dynamic process of DFIG of SWITSC, and provides a new direction for better and more effective study of wind turbine fault ride through in the future.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); stator winding inter-turn short circuit (SWITSC); high voltage ride through (HVRT); transient characteristics; Crowbar; chopper circuit

双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)已成为风力发电机的主流机型,研究DFIG的稳定可靠运行势在必行。一方面,定子绕组匝间短路(stator winding inter-turn short circuit, SWITSC)故障是DFIG常见的绝缘故障,且故障率较高^[1-3]。DFIG从SWITSC故障发生到发展为相间短路、接地短路故障,会持续较长的时间,严重影响系统的稳定运行。因此,研究发生SWITSC

故障的DFIG运行特性具有重要意义;另一方面,DFIG定子绕组与电网直接相连,使其对电压故障尤为敏感,电网电压骤降引起定子侧过电流,由于定、转子磁链的相互耦合,转子侧也会出现过电压和过电流现象,损坏变频器 and 电机本身。各地电力部门规定,电压故障时,DFIG需不间断供电,且为电网提供相应的无功支持,要求DFIG具备一定的故障穿越能力^[4-5]。

目前,电网故障时,常规的DFIG低电压穿越问题受到了广泛关注,但DFIG的HVRT问题研究甚少;且在SWITSC情况下,DFIG机组的HVRT问题鲜有研究。实现DFIG故障穿越方法有:改进控制策略和增加硬件电路。文献[6-7]提出一种基于定子磁链消磁和现代控制理论相结合的改进控制策略,用于抑制电压故障时的暂态过电流和过电压,但由于转子侧变流器(rotor side converter, RSC)容量限制,当电网急剧变化时,无法实现DFIG的故障穿越;文献[8-10]提出将撬棒保护电路串入转子侧来限制故障期间的过电流和过电压,但却忽略了直流母线电压的钳位效应。文献[11]提出一种将撬棒电路与改进控制策略相结合的控制方法,用以保护转子侧变流器。以上文献只研究了常规DFIG机组的故障穿越问题,但并未考虑DFIG常见的SWITSC故障,且对发生SWITSC故障的HVRT控制策略也并未提及。因此,研究发生SWITSC故障的DFIG暂态特性和HVRT控制策略具有重要意义。

相比于常规DFIG机组,SWITSC故障下的三相谐波电流更加不利于故障穿越的实现。本文在分析SWITSC故障下的电磁特性和电压骤升时的暂态特性基础上,提出一种撬棒电路和直流斩波电路相结合的HVRT控制策略。SWITSC故障恶化了电网电压上升对转子侧电流和直流母线电压的影响,增加了HVRT难度。转子撬棒电路和直流侧斩波电路显著提高了SWITSC故障机组的HVRT能力。本文的研究对掌握SWITSC的DFIG的动态过程具有一定的参考价值,为今后更好、更有效地研究风电机组的故障穿越提供了新的方向。

1 DFIG 电磁特性分析

1.1 SWITSC电磁特性分析

SWITSC故障主要发生在定子绕组的第一个线圈中,假设A相绕组第一个线圈短路,如图1所示。

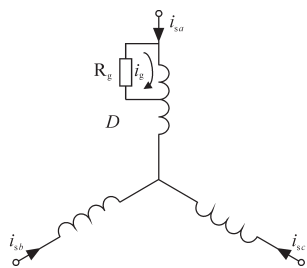


图1 SWITSC故障
Fig. 1 SWITSC fault

SWITSC故障后,A相有效绕组匝数显著减少,定子三相绕组不对称。图2给出了DFIG工作在额定状态($V=15\text{ m/s}, \omega_r=1.2$ (标么值)),SWITSC故障在 $t=2\text{ s}$ 时发生后的DFIG的定子电流 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 和短路电流 i_g 波形图。

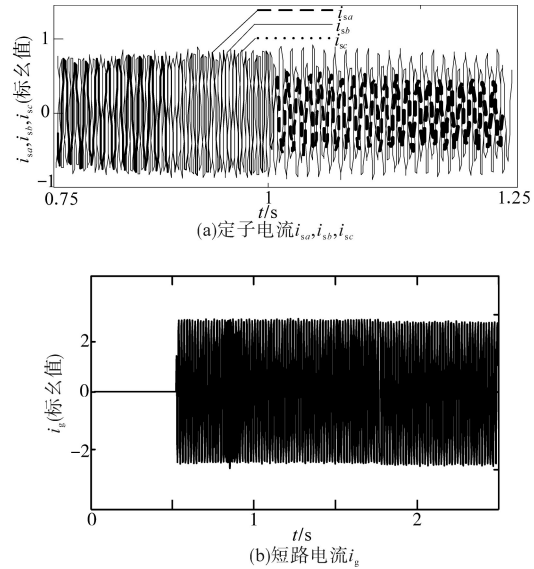


图2 SWITSC故障波形

Fig. 2 SWITSC fault waveforms

三相绕组不对称造成三相电流不对称,进而在磁动势中产生大量谐波分量,且各磁动势幅值和相位差变化很大。DFIG的电磁转矩为

$$T_e = \frac{\mu_0 \pi D L P}{2\delta} F_1 F_2 \sin\theta_{12} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; D 为铁心内径; L 为铁心长度; P 为极对数; δ 为气隙长度; F_1, F_2 分别为定、转子磁动势; θ_{12} 为定、转子间的空间角。

由于磁动势正比于定子电流,因此,在SWITSC故障后,电磁转矩急剧上升。

由图2b可知,在SWITSC故障后,短路电流 i_g 迅速增加。假设叠加短路电流为 $i_g = \sqrt{2} I \cos(\omega t)$, I 为网侧电流有效值。则其产生的 $f(\alpha, t)$ 为

$$f(\alpha, t) = \frac{2\sqrt{2} I}{\pi P} \sum_v \frac{1}{v} k_{dv} \cos(v\alpha) \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中: k_{dv} 为单匝线圈的节距因子; α 为两匝线圈间的空间电角度; v 为谐波阶数。

此时 $f(\theta, t)$ 为

$$f(\theta, t) = \frac{\sqrt{2} I}{\pi P} \sum_v \frac{1}{v} k_{yv} \cos(\omega t \pm vP\theta) \quad (3)$$

其中

$$\theta = \varphi + (1 - s)\omega t / P$$

式中: k_{yv} 为短转节距系数; θ 为定子坐标系下机械角; φ 为转子坐标系下机械角; s 为转差率。

因此,将 $f(\theta, t)$ 转换到转子坐标系下为

$$f(\varphi, t) = \frac{\sqrt{2}I}{\pi P} \sum_v \frac{1}{v} k_{yv} \cos[\omega t \pm (1-s)v\omega t + vP\varphi] \quad (4)$$

$f(\varphi, t)$ 产生的 e_r 为

$$e_r = \sum_v \sqrt{2} E_{rv} \frac{1}{v} k_{yv} \cos[\omega t \pm (1-s)v\omega t + vP\varphi] \quad (5)$$

式中: E_{rv} 为转子侧感应电动势的 v 次谐波有效值。

转子侧线圈感应的谐波电流分量为

$$f = [1 \pm (1-s)v] f_1 \quad v = 1/P, 2/P$$

式中: f_1 为转子侧电流基频。

1.2 HVRT故障下暂态特性分析

采用电机惯例的DFIG电压和磁链方程为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r \Psi_r \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_s, U_r 分别为定、转子电压; I_s, I_r 分别为定、转子电流; Ψ_s, Ψ_r 分别为定、转子磁链; R_s, R_r 为定、转子电阻; L_s, L_r 为定、转子电感; L_m 为定转子间互感; ω_r 为转子旋转角速度。

由于 R_s 较小,忽略 R_s 后, $U_s = d\Psi_s/dt$ 。电网正常时, U_s 恒定, Ψ_s 匀速旋转,其运行轨迹为圆形,即 $\Psi_s = \Psi_m e^{j\omega_1 t}$, Ψ_m 为 Ψ_s 的幅值, ω_1 为旋转角速度。因此 U_s 和 Ψ_s 间的关系为

$$U_s = j\omega_1 \Psi_s = j\omega_1 \Psi_m e^{j\omega_1 t} \quad (8)$$

电压故障时,为分析HVRT对 U_r 和 I_r 的影响,假设转子开路,即 $i_r = 0$ 。由式(6)、式(7)可确定定子磁链的一阶微分方程为

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = U_s - \frac{R_s}{L_s} \Psi_s \quad (9)$$

电网电压骤升后,根据磁链守恒原则, Ψ_s 不能突变。电压上升后,线圈上的感应电流会产生一个反向磁场来抵消磁通变化。因此,定子磁通由两部分组成:与电压有关的旋转分量和暂态衰减直流分量,即

$$\Psi_s = \Psi_{s0} e^{j\omega_1 t} + \Psi_{sDC} e^{-t/\tau} \quad (10)$$

式中: $\Psi_{s0} e^{j\omega_1 t}$ 为磁链的旋转分量; Ψ_{sDC} 为直流分量的初值,与电网电压上升程度有关。

假设 U_s 和 Ψ_s 在故障前后为

$$U_s = \begin{cases} |U_s| e^{j\omega_1 t} & t < t_0 \\ (1+d)|U_s| e^{j\omega_1 t} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Psi_s = \begin{cases} \frac{|U_s|}{j\omega_1} e^{j\omega_1 t} & t < t_0 \\ \frac{(1+d)|U_s|}{j\omega_1} e^{j\omega_1 t} - \frac{d|U_s|}{j\omega_1} e^{j(\omega_1 t_0 - 2/\pi)} e^{-t/\tau} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知, $\Psi_{s0} e^{j\omega_1 t}$ 正比于电压幅值;直流分量与 dU_s/ω_1 有关,且由电网电压骤升程度 d 决定,同步旋转角决定了直流分量的初始相位。当电压急剧上升时, $\Psi_{sDC} e^{-t/\tau}$ 大大增加,导致 I_s 增大。

为研究HVRT下 Ψ_s 对 U_r 和 I_r 的影响,根据式(6)、式(7)、式(9)得:

$$U_r = \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{d}{dt} - j\omega \right) \Psi_s + [R_r + \sigma L_r \left(\frac{d}{dt} - j\omega \right)] i_r \quad (13)$$

式中: σ 为泄漏系数。

HVRT故障时 U_r 的第一项与 Ψ_s 有关,第二项与 I_r 有关。仅考虑 Ψ_s 的影响, U_r 为

$$U_r = \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{d}{dt} - j\omega \right) \Psi_s \quad (14)$$

根据式(8)可知:

$$U_r = s \frac{L_m}{L_s} U_s \quad (15)$$

根据HVRT前后 Ψ_s 的动态变化,也可以将 U_r 写为旋转分量、直流分量的形式:

$$U_r = \begin{cases} \frac{L_m}{L_s} s |U_s| e^{j\omega_1 t} & t < t_0 \\ \frac{L_m}{L_s} (1+d) s |U_s| e^{j\omega_1 t} + \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega \right) \times \frac{d|U_s|}{\omega_1} e^{j(\omega_1 t_0 - 2/\pi)} e^{-t/\tau} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (16)$$

电压上升后,由 Ψ_s 引起的 U_r 为 $U_{r1} = U_{r0} + U_{rDC}$ 。忽略 R_s/L_s , U_r 简化为

$$U_{r0} = \frac{L_m}{L_s} (1+d) s |U_s| e^{j\omega_1 t} \quad (17)$$

$$U_{rDC} = \frac{L_m}{L_s} (1-s) d |U_s| e^{j\theta} e^{-t/\tau} \quad (18)$$

由以上分析可知, U_{r1} 也分为两部分。其中, U_{r0} 与转差率 s 和 $(1+d)$ 成正比; U_{rDC} 与电压骤升幅度和 $(1-s)$ 成正比,较 U_{r0} 大得多。当转子转速接近同步转速时, U_{r1} 迅速增大,若超过转子控制电压上限值时,RSC将失去控制,导致 I_r 瞬间增大,直流母线电压大幅升高。

由DFIG电磁特性分析发现,SWITSC故障时电流和磁动势的谐波分量加剧了HVRT时 I_r 和

直流母线电压 U_{dc} 的振荡幅度,不利于 HVRT 的实现。

2 改进控制方案

撬棒电路由电桥电路(二极管/晶闸管)、控制开关(GTO/IGBT)和旁路电阻组成。本文选用 IGBT 作为撬棒电路的控制开关。当电压大幅度上升时,必须采用硬件电路来实现 DFIG 的 HVRT。

2.1 开关控制策略

本文选择了一种同时检测 U_{dc} 和 I_r 的保护方案。当 I_r 或 U_{dc} 超过允许限值时,输入撬棒电路,其控制原理如图 3 所示。当撬棒保护电路输入后,RSC 失去控制,转子短路,相当于高转差率的鼠笼式异步电动机,不利于电网电压恢复。转子过电流是几十 ms 内最严重的故障,因此在这段时间内实现快速地开关切换控制对撬棒保护电路至关重要。同时,为加强故障期间对 U_{dc} 的有效控制,在直流侧增加了直流斩波电路,充分考虑了直流电压的钳位效应,与撬棒电路一起实现 DFIG 的 HVRT。

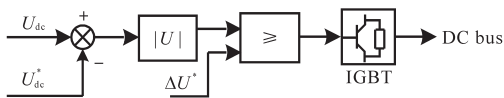


图3 直流卸荷电路
Fig.3 DC chopper control circuit

若检测到转子过电流或过电压时,D 触发器用于控制电网故障后几 ms 内投入撬棒电路。RSC 闭锁,旁路电阻吸收多余的能量,使暂态过电流迅速衰减;当转子电流衰减到极值以下时,切除撬棒电路,RSC 恢复工作,调节电机励磁向电网提供有功和无功功率,帮助电网电压恢复,其中限制电流决定撬棒电路的投切时间,其上限由变换器所能承受的最大电流决定,下限由 DFIG 提供的无功功率决定。值越小,对转子侧变流器的保护越强,撬棒电路的投入时间越长,但不利于电压的恢复,反之亦然。当斩波电路检测到 U_{dc} 高于其允许限值时,IGBT 开关控制直流斩波电路输入,直流放电电阻消耗直流母线的过电压。当 U_{dc} 在允许范围时,斩波电路自动切除。同样,电压变化限值 U^* 决定斩波电路的输入时间,且该值越大,斩波电路输入时间越短。

2.2 电阻选择

撬棒保护电路中的电阻影响着 U_r 。文献[12]指出,当电网电压因系统故障变化时,转子电压

峰值随撬棒电阻的增加单调增大,因此需合理选择其值。当其值过大时,会引起直流母线和开关元件的过电压,甚至可能击穿直流电容和电力电子器件。因此,应在变换器电压允许范围内尽可能的增大撬棒电阻,以加快故障衰减速度。根据文献[4,13]可知,定、转子短路电流的峰值通常出现在短路后的半个周期内,因此, $I_{r,max}$ 的估值为

$$I_{r,max} = |i_r [T/2]| \quad (19)$$

撬棒电路输入后转子最大电压为

$$U_{r,max} = I_{r,max} R_{crow} \quad (20)$$

考虑到 RSC 中电流和 GSC 中电压的影响, $U_{r,max}$ 应符合: $U_{r,max} < U_{r,lim}$ 。此时撬棒的最大阻值为

$$R_{crow} = \frac{U_{r,lim}}{I_{r,max}} \quad (21)$$

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中编制 DFIG 正常和 SWITSC 故障下的 s 函数,建立增加转子侧撬棒电路和直流斩波电路的 DFIG 系统模型。其中双馈感应发电机参数为:额定功率 1.5 MW,额定频率 60 Hz,定子额定电压 575 V,直流母线额定电压 1 200 V,定子电阻 0.023(标么值),转子电阻 0.016(标么值),定子漏感 0.18(标么值),转子漏感 0.16(标么值),定转子间的互感为 2.9(标么值),匝间短路比 $\mu=0.15$,短路电阻 $R_g=0.01 \Omega$,撬棒限流电阻 $R_{crow}=10 \Omega$,直流斩波电阻 $R_{dc}=2 \Omega$ 。由于 MW 级 DFIG 转动惯量较大,且电网电压骤升暂态过程较短,因此在整个过程中认为 DFIG 转速不变。

3.1 HVRT 时无保护电路投入

假设电压在 $t=1$ s 时骤升至 1.3(标么值),故障持续时间为 0.1 s,撬棒电路和直流斩波电路未投入下 DFIG 在正常和 SWITSC 故障情况下的运行特性如图 4a~图 4f 所示。可以看出,电网电压骤升故障前 DFIG 稳定运行,电压、电流波形良好,DFIG 输出有功功率为 1(标么值),直流母线电压基本稳定在 1(标么值)。电压上升后,正常和 SWITSC 故障的 DFIG 的 U_{dc} 分别增加到 1.3(标么值)和 1.35(标么值);正常 DFIG 的定子电流和转子电流分别增大到 1.9(标么值)和 2.2(标么值);SWITSC 故障时,有效匝数减小,等效阻抗减小,电网电压骤升时电流明显增大,DFIG 的定子电流和转子电流则分别增大到 2.3(标么值)和 2.6(标么值)。此外,故障期间 DFIG 的有功输出在正常和 SWITSC 故障情况下分别降低到 0.5(标么

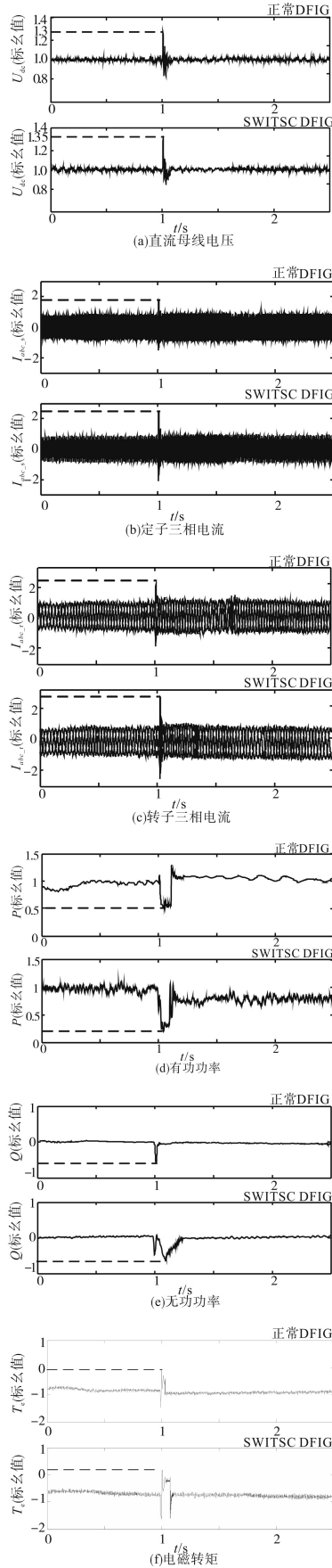


图4 DFIG运行特性

Fig.4 DFIG operating characteristics

值)和0.28(标么值),且SWITSC故障的DFIG较正常的DFIG无功支撑能力变弱。可见,SWITSC故障下的三相不平衡电流加剧了电网电压故障下的暂态故障分量,恶化了电网电压骤升对DFIG的影响,增加了HVRT的难度。

3.2 HVRT时撬棒和斩波电路投入

电压在 $t=1$ s时骤升至1.3(标么值),故障持续时间为0.1 s,撬棒电路和直流斩波电路投入后发生SWITSC的DFIG运行情况如图5a~图5g所示。

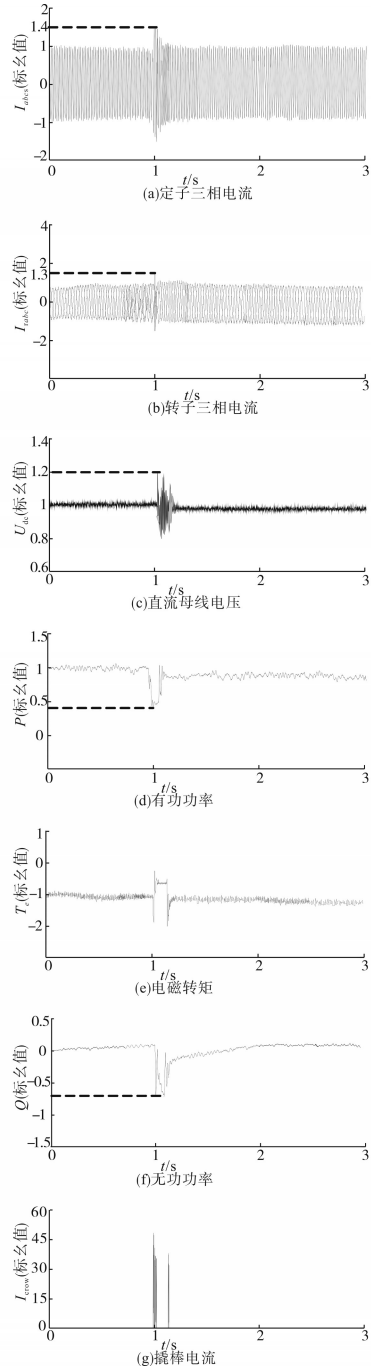


图5 改进控制策略下DFIG运行特性

Fig.5 DFIG operating characteristics under improved control strategy

电压骤升时,在撬棒电路和直流斩波电路投入后对 I_s 和 I_r 有一定抑制作用,内部撬棒电阻吸收电机多余的能量,抑制瞬时故障电流的交流分量,并迅速衰减瞬时直流分量,SWITSC故障的DFIG的 I_s 和 I_r 仅分别增大至1.4(标么值)和1.3(标么值);高电压穿越过程中,由于功率的不平衡,造成 U_{dc} 骤升,但在控制电路投入的情况直流母线电压峰值由1.35(标么值)降至1.2(标么值);此外,由于撬棒保护电路抑制转子过电流,避免多余的能量流入直流母线,改善了DFIG的功率不平衡现象,DFIG输出的有功功率随保护电路的投入有所增加;定子三相不对称电流的有效抑制也减缓了电磁转矩的振动幅度;此外,由撬棒电流波形可以看出,撬棒电路的切换时间足够短,缩小了转子侧变流器的失控时间,有利于电网电压的恢复。

4 结论

本文对SWITSC故障下的电磁特性和HVRT时的暂态特性进行了详细分析,在此基础上,提出一种撬棒电路和直流斩波电路相结合的HVRT控制策略,得出以下结论:

1) SWITSC故障引起的三相不平衡电流造成 I_r 突增、 T_e 振荡幅度增加;

2) 转子谐波电流分量加剧了HVRT期间转子过电流和直流母线过电压,SWITSC故障恶化了电压骤升对DFIG的影响,增加了HVRT难度;

3) 转子侧撬棒电路和直流侧斩波电路显著提高了SWITSC故障机组的高电压穿越能力。

本文的研究对掌握SWITSC的DFIG的动态过程具有一定的参考价值,为今后更好、更有效地研究风电机组的故障穿越提供了新的方向。

参考文献

[1] 贺益康,胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热

点问题[J]. 中国电机工程学报,2012,32(27):1-15.

- [2] Ribrant J, Bertling L. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005[C]// USA 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007:24-28.
- [3] 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.
- [4] Ruiqi, Geng Hua, Yang Geng. Fault ride-through of renewable energy conversion systems during voltage recovery[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 37(4): 14-20.
- [5] Weise B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 25-36.
- [6] XIANG Dawei, YANG Shunchang, 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.
- [7] Morren J, Sjoerd W H Haan. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1): 435-441.
- [8] 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.
- [9] 郑涛,魏占鹏,迟永宁,等. 考虑撬棒保护动作时间的双馈风电机组短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 25-30.
- [10] 杜强,张惠娟,张同庆. 双馈风力发电机组撬棒电路保护技术的研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(8): 48-50.
- [11] 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.
- [12] 朱晓东,石磊,陈宁,等. 考虑Crowbar阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 84-89.
- [13] LI D D. Analysis of short circuit current of wind turbine doubly-fed induction generator[C]//Proceedings of the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2006:1-5.
- [14] 唐浩,郑涛,黄少峰,等. 考虑Chopper动作的双馈风电机组三相短路电流分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 76-83.

收稿日期:2019-12-08

修改稿日期:2019-12-29