

基于定子串联阻抗的 DFIG 低电压穿越控制策略

马州生¹, 张发厅²

(1. 河南经贸职业学院 电子信息学院, 河南 郑州 450000;

2. 黄河科技学院 机械工程学院, 河南 郑州 450063)

摘要:针对双馈感应风力发电机(DFIG)撬棒保护实现故障穿越的不足,从电网电压跌落期间机组的整体需求出发,提出一种基于定子串联阻抗的 DFIG 低电压穿越综合控制策略。分析了定子串联阻抗控制策略改善 DFIG 故障穿越的机理,给出了串联阻抗阻值的整定方法。在转子侧换流器中附加无功补偿控制策略,充分发挥了定子侧的无功支撑能力,加快电网电压的恢复。仿真结果表明:所提的综合控制策略增强了 DFIG 的故障穿越能力,抑制了转子电流、直流母线电压、电磁转矩的冲击,同时能够满足无功支撑的需求,克服了传统撬棒保护的不足,兼顾了故障结束后机组的稳定运行。

关键词:双馈感应风力发电机;低电压穿越;定子串联阻抗;阻值整定;无功补偿

中图分类号:TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19671

Low Voltage Ride Through Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator Based on Stator Series Impedance

MA Zhousheng¹, ZHANG Fating²

(1. School of Electronic Information, Henan Institute of Economics and Trade,

Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. School of Mechanical Engineering,

Huanghe S&T College, Zhengzhou 450063, Henan, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of doubly fed induction generator (DFIG) crowbar protection, based on the overall demand of the unit during the voltage drop, a DFIG low voltage ride through integrated control strategy based on stator series impedance was proposed. The mechanism of stator series impedance to improve DFIG fault ride through was analyzed, and the setting method of series impedance resistance was given. Additional reactive power compensation control strategy was adopted in rotor side converter, the stator side of the reactive support capacity was given full play, the grid voltage recovery was sped up. The simulation results show that the proposed integrated control strategy enhances the fault ride through capability of DFIG, the rotor current, DC bus voltage and electromagnetic torque are suppressed. At the same time, it can meet the needs of reactive power support, overcome the shortcomings of the traditional Crowbar protection, and take into account the stability of the unit after the end of the operation.

Key words: doubly fed induction generator(DFIG); low voltage ride through(LVRT); stator series impedance; resistance setting; reactive power compensation

随着以双馈感应风力发电机(DFIG)为主流机型的并网风电规模不断扩大,风电机组的稳定运行对电力系统影响已不容忽视,风机大规模脱网会严重威胁系统运行。因此,提高 DFIG 的故障穿越能力十分必要。

近年来,国内外学者关于 DFIG 低电压穿越(LVRT)研究成果主要分为 2 类:电网电压故障

较轻时,通过改进控制策略以增强 DFIG 的故障穿越能力:重新给定转子电流的参考值,使其产生与定子磁链暂态直流分量相反的转子电流自由分量,加快暂态磁链衰减的“灭磁”控制^[1-3];为最大限度发挥换流器的控制能力,对其进行前馈补偿的改进控制策略^[4];采用 PI-R 谐振控制改善 PI 调节器不足的控制策略^[5-6]等。改进控制

作者简介:马州生(1968—),男,本科,讲师,Email:mazhousheng1123@163.com

策略虽能在一定程度上改善 DFIG 的故障穿越能力,但对机组参数具有较大的依赖性,且电网电压大幅跌落时,受换流器功率的限制,无法输出足够的电压来抵消转子绕组中的反电动势。电网电压故障严重时,由附加硬件电路增强 DFIG 的故障穿越能力:附加串联网侧换流器^[7]、动态电压恢复器 DVR^[8-10]、SVC 和 STATCOM^[11-12]及超导储能设备^[13]等。但附加硬件电路需投入昂贵的换流器、电容器、滤波电感等硬件设备,增加了系统的成本。撬棒保护由于其简单有效、成本低廉成为目前应用最为广泛的硬件保护方案之一^[14-15],但 Crowbar 电路投入以后转子侧换流器被封锁,DFIG 作为感应电机运转,需从电网进行励磁,无功需求增大,对电网电压的稳定造成影响。而且破坏了换流器间的功率平衡关系,致使直流母线电压大幅度骤升,同时会产生巨大的电磁转矩冲击,缩短主轴及齿轮箱的使用寿命。此外,撬棒的投入使故障电流频率为非工频,影响基于工频傅氏算法的动作特性。

针对撬棒保护存在的问题,文献[16-17]提出转子串联电阻的 LVRT 控制策略,但较大的串联电阻会削弱定子阻尼^[18],且电阻上压降不利于换流器进行功率控制;文献[19]提出定子串联电感的低电压穿越方法,但由于定子磁链弱阻尼特性,导致 DFIG 再次遭受较大的电磁暂态冲击。因此,在定子中串入一定的电阻来消耗储存在电感中的能量非常必要。文献[20]提出了定子串联电阻的综合低电压穿越控制策略,但未对定子串联电阻阻值的整定进行理论推导,只给出了算例机组的最优值,受机组参数、控制策略等因素的影响不具有普遍适用性,且由于附加硬件电路较多,致使系统成本增加。

本文提出一种基于定子串联阻抗的 DFIG 低电压穿越综合控制策略,分析了定子串联阻抗改善 DFIG 故障穿越的机理,在减小转子感应电动势,抑制转子电流冲击的同时降低了电磁转矩的振荡幅度,且给出了定子串联阻抗阻值的整定方法;不同于文献[20],利用 RSC 的无功注入能力优于 GSC,在 RSC 中附加无功补偿控制策略,充分发挥定子侧的无功支撑能力,加快电网电压的恢复。仿真结果表明,本文所提的控制策略弥补了撬棒保护的不足,满足了系统无功支撑的需求,改善了 DFIG 的瞬态性能,兼顾了故障结束后机组的稳定运行。

1 电网故障下 DFIG 暂态特性分析

1.1 DFIG 数学模型

采用电动机惯例,将所有变量折算到定子侧,且忽略磁饱和现象后,DFIG 在定子静止坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + d\Psi_s / dt \\ U_r = R_r I_r + d\Psi_r / dt - j\omega_r \Psi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: U, I, Ψ 分别为电压、电流、磁链矢量; R 为电阻; L 为电感; L_m 为定转子间互感; ω_r 为转子旋转角速度;下标 s, r 分别为定、转子分量。

1.2 电网故障时 DFIG 暂态特性分析

电网电压故障时,机端电压由 $U_s = U_s e^{j\omega_1 t}$ 跌落至 $U_s = dU_s e^{j\omega_1 t}$, 其中, U_s 为稳态运行时电网电压幅值, ω_1 为同步旋转角速度, d 为电网电压跌落幅度。对于 MW 级 DFIG, R_s 非常小,可忽略不计,由式(1)得故障前后 Ψ_s 为

$$\Psi_s = \begin{cases} (U_s \cdot e^{j\omega_1 t}) / j\omega_1 \\ (dU_s \cdot e^{j\omega_1 t}) / j\omega_1 + (1-d)U_s \cdot e^{-t/\tau_s} / (j\omega_1) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\tau_s = L_s / R_s$

式中: τ_s 为定子磁链衰减时间常数。

根据式(1)、式(2)可得转子电压方程为

$$\sigma L_r dI_r / dt = -R_r I_r + j\omega_r \sigma L_r I_r - E_r + U_r \quad (4)$$

$$E_r = L_m / L_s [d(-j\omega_r) / dt] \Psi_s \quad (5)$$

其中 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_r L_s)$

式中: E_r 为转子感应电动势,也就是转子开路电压。

将式(3)代入式(5),且忽略 $1/\tau_s$ 这一较小项后, E_r 为

$$E_r = \begin{cases} L_m s U_s e^{j\omega_1 t} / L_s \\ L_m s d U_s e^{j\omega_1 t} / L_s - L_m (1-s)(1-d) U_s e^{-t/\tau_s} / L_s \end{cases} \quad (6)$$

换流器采用空间矢量脉宽调制(SVPWM)方式时,RSC 输出电压幅值上限约为 $1.3U_s$ ^[18],若使转子电流在故障期间可控,则需满足条件: $L_m s d U_s / L_s - L_m (1-s)(1-d) U_s / L_s \leq 1.3U_s$,此时 $d \leq 0.1L_s / L_m$ 。可见,DFIG 自身的故障穿越能力非常弱。

若 $t=0$,电网电压由 $U_s e^{j\omega_1 t}$ 跌落至 $0.2U_s e^{j\omega_1 t}$,即 $d=0.2$,且 DFIG 处于超同步运行状态,转差

率 $s = -0.2$, 由式(6)可知, 故障前后转子感应电动势之比为 $1:5$ 。可以看出, 电网电压跌落导致转子绕组中产生极大的感应电动势, 且故障前后转子感应电动势之比随电网电压下降深度的增加而增大。电网电压故障较轻时, E_r 较小, 转子侧换流器输出的电压可以抵消此感应电动势的作用, 能够实现对转子电流的有效控制; 电网电压故障严重时, Ψ_s 中暂态直流分量的存在使其产生较大的 E_r , 由于 RSC 自身功率的限制, 无法提供足够大的转子电压抵消此感应电动势, 造成转子电流冲击。

2 定子串联阻抗 LVRT 控制策略

2.1 定子串联阻抗改善 LVRT 机理

图 1 给出了定子串联阻抗电路图, 通过控制电力电子器件开关实现定子串联阻抗的切入和切出, 且在 DFIG 运行期间无需封锁转子侧换流器, DFIG 始终处于可控状态, 解决了 Crowbar 保护电路存在的电机失控问题。

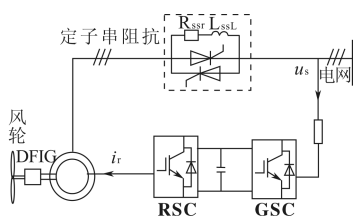


图 1 定子串联阻抗电路图

Fig. 1 Circuit diagram of stator series impedance

由式(1)和式(2)可得, U_r 在转子参考坐标系下的另一种形式为

$$U_r = R'_r I_r + \sigma L_r dI_r/dt + E'_r \quad (7)$$

$$E'_r = L_m [U_s - R_s/(L_s \Psi_s) - j\omega_r \Psi_s]/L_s \quad (8)$$

$$R'_r = R_r + [L_m/L_s]^2 R_s \quad (9)$$

式中: R'_r 为转子等效电阻, 上标 r 为转子坐标系下的变量。

图 2 给出了 DFIG 转子侧等效电路。

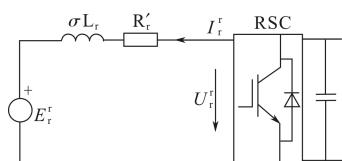


图 2 DFIG 转子侧等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DFIG's rotor

由图 2 可知, 定子串联电阻相当于增加了转

子等效电阻, 从而对转子过电流起到抑制作用, 且串联电阻能够快速消耗电压跌落期间存储在电感中的能量, 防止电网电压恢复时能量的馈出导致 DFIG 再次遭受较大的暂态冲击。定子串联电抗相当于增加了定子等效电感 L_s , 从而减小了电网电压故障后转子感应电动势 E'_r , 使 RSC 能够抵消此瞬态电动势, 进而抑制转子过电流。

此外, 定子串联电抗能够有效抑制电网电压故障时巨大的电磁转矩冲击, DFIG 的转矩 T_e 为

$$T_e = n_p L_m I_m (\Psi_s i_r^*)/L_s \quad (10)$$

式中: n_p 为极对数; $*$ 表示共轭。

定子串联电抗使其等效电感 L_s 增加, 抑制电磁转矩冲击的能力增强, 延长 DFIG 主轴及齿轮箱的使用寿命。且由于定子电阻的增加, 抵消了由于定子串联电抗带来的电磁转矩振荡时间延长的负面影响。

2.2 定子串联阻抗阻值整定

定子串联电感 L_{ssL} 后, $L'_s = L_s + L_{ssL}$, 为保证转子侧换流器可控, 由上述分析可知, 转子感应电动势需满足:

$$L_m |1-s-d| U_s / (N L'_s) \leq 1.3 U_s \quad (11)$$

式中: N 为定转子绕组匝数比。

由式(11)可得定子串联电感 L_{ssL} 为

$$L_{ssL} \geq L_m |1-s-d| / (1.3N) - L_s \quad (12)$$

根据我国低电压穿越的要求: 当 U_s 跌落至 0.2 (标么值) 时, DFIG 应维持 625 ms 不脱网继续运行。由此可知定子时间常数为 156.25 ms, 由 $\tau'_s = L'_s / (R_s + R_{ssr}) \approx 0.156$, 可近似求出定子串联电阻 R_{ssr} 为

$$R_{ssr} = L'_s / 0.156 - R_s \quad (13)$$

3 故障期间的无功补偿

3.1 转子侧换流器无功控制

不同于传统撬棒保护, 定子串联阻抗的综合控制策略无需封锁转子侧换流器, DFIG 始终处于可控状态, 可以充分发挥定子侧的无功支撑能力, 对 RSC 进行无功补偿控制, 加快电网电压的恢复。RSC 采用电网电压定向矢量控制策略时, 定、转子 q 轴电流分量与无功功率有如下关系:

$$\begin{cases} i_{sq} = 2Q_s / (3U_s) \\ i_{sq} = -[U_s / (\omega_s L_m) + 2Q_s L_s / (3U_s L_m)] \end{cases} \quad (14)$$

式中: Q_s 为定子无功功率。

根据 LVRT 期间无功电流输出的要求, 定子无功

电流 i_{sq} 需满足:

$$i_{sq} = 1.5(0.9 - U_s) \quad (15)$$

联立式(14)和式(15)可得转子电流无功分量的参考值为

$$i_{rq_ref} = -\left[\frac{U_s}{\omega_s L_m} + \frac{3L_s}{2L_m}(0.9 - U_s)\right] \quad (16)$$

电压跌落期间,通过转子侧换流器向电网注入一定的无功功率,帮助故障电网的快速恢复。同时,输出无功还要考虑 DFIG 暂态稳定性要求,则 DFIG 暂态稳定性需满足:

$$i_{rq} \leq 2U_s / (\omega_s L_m) \quad (17)$$

考虑转子电流的最大值 I_{r_max} ,定子侧输出有功电流要满足:

$$i_{rd} \leq \sqrt{I_{r_max}^2 - i_{rq}^2} \quad (18)$$

由式(16)~式(18)可得,定子串联阻抗的综合控制策略时转子侧换流器有功、无功电流的约束条件。

3.2 LVRT 综合控制策略

定子串联阻抗的 LVRT 综合控制策略如图 3 所示。当电网电压故障时,将其由传统矢量控制模式切换至功率协调控制;当检测到转子电流超出其阈值 2(标么值)时,将定子串联阻抗电路投入,以此来减小转子开路电压,抑制转子过电流;检测到转子电流低于其阈值 I_{r_th} 时,定子串联阻抗电路切除;延时 100 ms 将 RSC 切换至传统矢量控制策略。

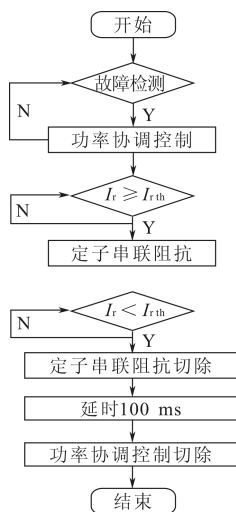


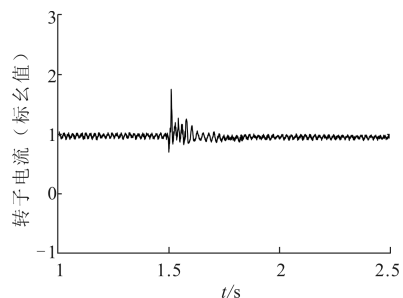
图 3 定子串联阻抗综合控制策略

Fig. 3 Integrated control strategy of stator series impedance

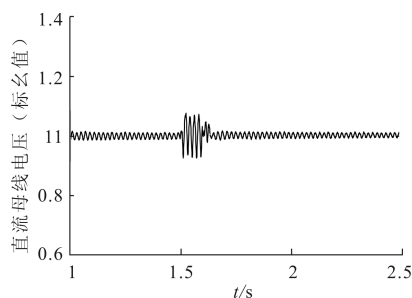
4 仿真分析

为验证定子串联阻抗综合控制策略的有效

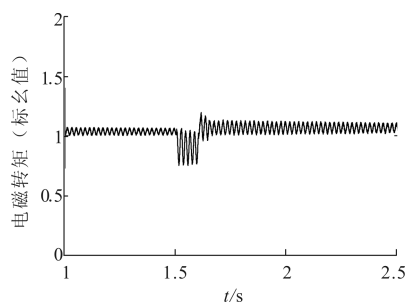
性,在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建图 1 所示的仿真模型,其中 DFIG 参数为:额定功率为 1.5 MW,额定频率为 50 Hz,极对数为 3,定子额定线电压为 690 V,直流母线额定电压为 1 200 V,定子电阻为 0.007 06(标么值),转子电阻为 0.005(标么值),定子漏感为 0.171(标么值),转子漏感为 0.156(标么值),定转子间的互感为 2.9(标么值),转差率 $s = -0.2$ 。



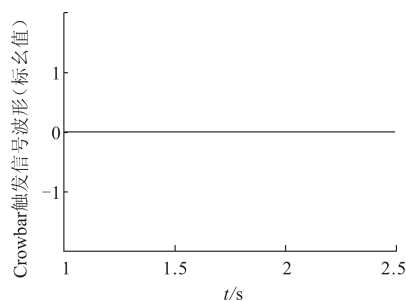
(a) 转子电流波形



(b) 直流母线电压波形



(c) 电磁转矩波形



(d) Crowbar 触发信号波形

图 4 DFIG 低电压穿越瞬态响应

Fig. 4 Transient response of DFIG under low voltage ride through

电网电压在 $t=1.5\text{ s}$ 时跌落至 $0.7U_s$,图 4 给出了采用本文所提控制策略下 DFIG 低压穿越瞬态响应波形。由图 4 可以看出,电网电压跌落程度较轻时,仅通过功率协调控制策略就能将转子电流和直流母线电压抑制在安全限值内,此时定子串联阻抗电路无需投入。

图 5 给出了电网电压在 $t=1.5\text{ s}$ 跌落至 0.2 (标么值), $t=1.8\text{ s}$ 故障恢复时 LVRT 效果对比图。

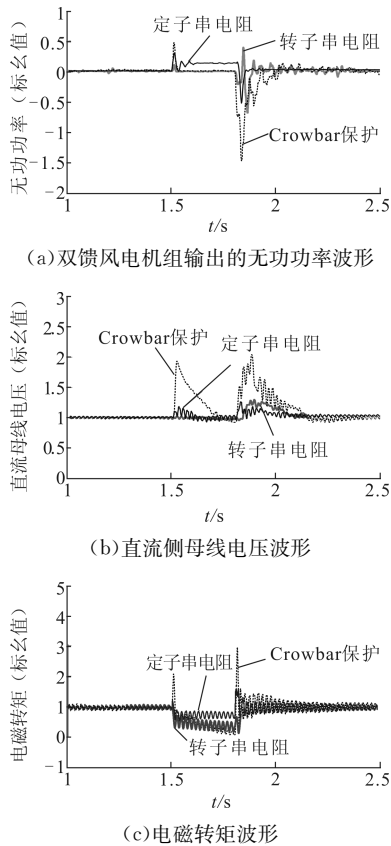


图 5 LVRT 效果对比

Fig. 5 Comparison of LVRT effects

利用本文所提定子串联阻抗综合控制策略与传统 Crowbar 保护和转子串电阻保护实现 LVRT 时的效果对比。由此看出,Crowbar 保护造成电网电压跌落期间 RSC 封闭,DFIG 作为感应电机运转,需从电网进行励磁,吸收大量的无功功率,不利于电网电压的恢复,且破坏了转子侧换流器和网侧换流器间的功率平衡关系,致使直流母线电压大幅度骤升,同时还会产生巨大的瞬时电磁转矩冲击;转子串电阻保护时直流母线电压、电磁转矩的波动较 Crowbar 保护有所改善;不同于 Crowbar 保护,本文所采用的控制策略能够实现电网跌落期间的不间断运行,且从机

组的整体需求出发,优先利用转子侧换流器发出一定的无功功率,支撑并网点电压,且直流母线电压和电磁转矩的波动远小于上述 2 种控制策略,弥补了 Crowbar 的不足,增强了 DFIG 的 LVRT 能力,且有利于故障结束后机组的稳定运行。

若电网电压在 $t=1.5\text{ s}$ 时跌落至 0.2 (标么值), $t=1.6\text{ s}$ 时故障恢复,图 6 给出了定子串联阻抗与定子分别串联电阻和电感的控制策略下电压穿越的效果对比。由故障期间转子电流的波形可以看出,定子串联电阻和阻抗的方式都能使转子电流处于安全限值 2 (标么值) 以内,表明了定子串联一定的电阻对提高机组 LVRT 的重要性,但定子串联电阻的控制方式在电网电压恢复时会再次遭受转子电流冲击。定子串联电感的控制策略仍会出现瞬时转子过电流现象,低电压穿越能力较差,且由于电感的投入,定子时间常数增加,转子电流最大值的出现时间略晚于定子串联阻抗的控制策略。由故障期间电磁转矩的波形可以看出,仅采取定子串联电感的控制策略,虽能减弱电磁转矩的振荡幅度,但电磁转矩的振荡时间延长,对机组稳定性的恢复造成不利影响;定子串联阻抗的综合控制策略在抑制电磁转矩振荡幅度的基础上,加快了电磁转矩的收敛速度,能够获得更好的瞬态响应。本文所提的定子串联阻抗的控制策略增强了 DFIG 的 LVRT 能力,且有利于故障结束后机组的稳定运行。

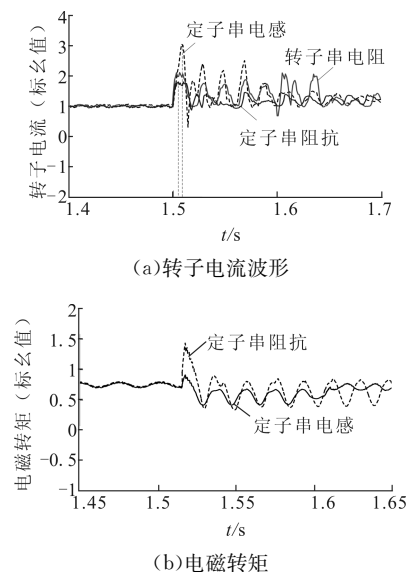


图 6 DFIG 低电压穿越瞬态响应

Fig. 6 Transient response of DFIG under low voltage ride through

5 结论

针对 DFIG 撬棒保护的不足,本文从电网电压跌落期间机组的整体需求出发,提出一种定子串联阻抗的 DFIG 低电压穿越综合控制策略。分析了定子串联阻抗改善 LVRT 的运行机理,给出串联阻抗阻值的整定方法,且对转子侧换流器进行无功补偿控制,仿真验证了该方案的优越性。具体结论有:

1)定子串联电阻改善了 DFIG 的弱阻尼特性,对转子过电流起到抑制作用;定子串联电感减小了转子感应电动势,使 RSC 对转子电流可控;且抑制了故障期间电磁转矩的振荡幅度,延长了 DFIG 主轴及齿轮箱的使用寿命;

2)定子串联阻抗阻值的整定综合考虑了暂态电流抑制和快速退磁 2 个方面;

3)该综合控制策略克服了 Crowbar 保护的不足,确保了 DFIG 在 LVRT 期间的不间断运行,并能提供约为额定的无功电流支撑,提高了 DFIG 的故障穿越能力,同时兼顾了故障结束后机组的稳定运行。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 赵宏博,汤海雁,张文亮,等. 双馈风电机组零电压穿越暂态特性分析及综合控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(5):1422-1430.
- [3] 周临原,刘进军,周恩展. 对称电网故障下双馈式风力发电系统去磁控制[J]. 电网技术, 2014, 38(12):3424-3430.
- [4] YANG L H, XU Z, OSTERGAARD J, *et al.* Advanced Control Strategy of DFIG Wind Turbines for Power System Fault Ride Through[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2):713-722.
- [5] 张禄,金新民,唐芬,等. 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):106-116.
- [6] HU J, HE Y. DFIG Wind Generation Systems Operating with Limited Converter Rating Considered under Unbalanced Network Conditions Analysis and Control Design[J]. Renewable Energy, 2011, 36(2):829-847.
- [7] YAO J, LI H, CHEN Z, *et al.* Enhanced Control of a DFIG-based Wind-power Generation System with Series Grid-side Converter under Unbalanced Grid Voltage Conditions[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(7):3167-3181.
- [8] 陈建,任永峰,胡宏彬,等. 基于 DVR 的风电机组低电压穿越仿真研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(8):28-32.
- [9] Wessels C, Gebhardt F, Fuchs F W. Fault Ride-through of a DFIG Wind Turbine Using a Dynamic Voltage Restorer during Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults[J]. IEEE Trans Power Electron. 2011, 26(3):807-815.
- [10] 陈国栋,张亮,蔡旭. 基于基波与谐波正负序提取方法的动态电压恢复器补偿策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11):87-91.
- [11] 易桂平,胡仁杰,蒋伟,等. 电网电压不平衡对 STATCOM 的影响及抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6):238-247.
- [12] 王成福,梁军,张利,等. 基于静止同步补偿器的风电场无功电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):23-28.
- [13] Yunus A M S, Masoum M A S, Abu-Siada A. Application of SMES to Enhance the Dynamic Performance of DFIG During Voltage Sag and Swell[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2012, 22(4):5702009.
- [14] 孟永庆,翁钰,王锡凡,等. 双馈感应发电机暂态性能精确计算及 Crowbar 电路参数优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8):23-29.
- [15] 徐玉琴,曹璐璐. 双馈感应风力发电机暂态特性分析及 Crowbar 阻值优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4):93-100.
- [16] 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.
- [17] 张文娟,马浩森,张国慨,等. 基于转子串联电阻的双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12):28-33.
- [18] 张琛,李征,蔡旭,等. 采用定子串联阻抗的双馈风电机组低电压主动穿越技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12):2943-2951.
- [19] 姜惠兰,李天鹏,吴玉璋,等. 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.
- [20] 李凤婷,陈伟伟,樊艳芳,等. 基于电压跌落程度及变阻值的 DFIG 低电压穿越综合策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12):3408-3413.

收稿日期:2018-11-06

修改稿日期:2019-01-18