

DOI: 10.7667/PSPC170634

应用于风力发电系统中的撬棒阻值整定新方法

李圣清, 明瑶, 张煜文, 吴文凤, 马定寰

(湖南省重点实验室(湖南工业大学), 湖南 株洲 412000)

摘要: 在电网发生电压跌落故障的情况下, 双馈异步发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)多采用撬棒保护电路以实现低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT), 而撬棒阻值的选择对机组的 LVRT 效果影响很大。从 DFIG 在电压跌落故障下的暂态数学模型出发, 运用空间矢量分析和拉普拉斯变换的方法, 推导出风电机组在电压跌落故障下的暂态电流时域表达式、转子侧故障电流的计算式。由此提出一种切合工程实际的撬棒阻值整定方法, 解决了投入撬棒保护电路后转子侧出现过电流和直流母线过电压的问题。算例及仿真实验数据均表明, 采用该方法可有效抑制暂态故障分量, 显著提高风力发电系统的 LVRT 水平。

关键词: 双馈异步发电机; 低电压穿越; 撬棒阻值; 电压跌落; 暂态故障电流

A new method of Crowbar resistance setting used in wind power generation system

LI Shengqing, MING Yao, ZHANG Yuwen, WU Wenfeng, MA Dinghuan

(Key Laboratory of Hunan Province, Hunan University of Industry, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) often adopts Crowbar protective circuit to realize Low Voltage Ride Through (LVRT) under voltage drop fault of power grid. Crowbar resistance will affect LVRT effect of the unit significantly. Time domain expression of transient current of the wind turbine generator system under the voltage drop fault and the calculation formula of fault current at the rotor side are deduced through space vector analysis and Laplace transformation based on the transient mathematical model of DFIG system under voltage drop. A Crowbar resistance adjustment method conforming to engineering practices is proposed, which overcomes the overcurrent at the rotor side and overvoltage of DC bus after Crowbar protective circuit is applied. Both case study and the simulation test demonstrate that the proposed method can inhibit the transient fault component effectively and increase the LVRT level of DFIG system significantly.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2017JJ4024).

Key words: doubly-fed induction generator; low voltage ride through; Crowbar resistance; voltage drop; transient fault current

0 引言

鉴于风电发展规模的不断增加, 为减少或消除机组脱网所造成的不利影响, 各国在并网规范上达成了共识: 要求联网运行的风电机组在一定幅度和持续时间的电压跌落故障下不得脱网运行, 即要求风电机组具有 LVRT 的能力, 必要时还需要向故障电网提供无功功率支持, 帮助电网电压的恢复^[1]。目前, 诸多发达国家都根据自身的电网情况, 对风电接入电网后的 LVRT 性能制定了相关的技术标准,

并通过实际的运行情况对其进行不断的改进。因此, LVRT 技术已成为风力发电大规模并网运行的热点技术之一。

国内外相关学者已在此领域内做了很多研究, 且提出了一些解决方案。文献[2-4]建立了双馈异步发电机以及控制系统的仿真模型, 对其在电压跌落故障下开展了仿真和研究, 初步分析了电网电压跌落对双馈风力发电机运行特性的影响。文献[5-10]主要推导了 DFIG 在并网运行条件下发生机端对称三相短路后定、转子电流在三相静止坐标系下的数学表达式, 并根据所推导的转子电流表达式初步整定了撬棒保护电路的阻值。但仅从限制转子侧最大电压和防止网侧变流器直流侧过电压两个方面着手, 考虑的因素较少, 难以应用于复杂的工程实践。

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ4024); 湖南省重点实验室(2016TP1018); 湖南省教育厅开放基金项目(15k036)

文献[10-16]主要从磁链角度出发, 推导并给出了DFIG在并网运行的情况下机端发生三相对称短路故障后转子电流的时域表达式, 并考虑了撬棒阻值的大小和投入、退出时间对DFIG低电压穿越动态特性的影响。

本文从DFIG风力发电系统在电压跌落下的暂态数学模型出发, 运用空间矢量分析和拉普拉斯变换方法, 推导出风电机组在电压跌落下的暂态电流时域表达式、转子侧故障电流的计算式, 并由此提出一种切合工程实际的撬棒阻值整定方法, 综合考虑了电压跌落发生的位置和转子绕组电阻的影响。解决了投入撬棒保护电路后转子侧的过电流和直流母线过电压的问题。算例及仿真实验结果均表明, 该整定撬棒阻值的方法简单实用, 可有效提高风力发电系统的LVRT水平。

1 DFIG的数学模型

图1给出了一种典型的含有撬棒保护电路的并网型DFIG发电系统结构图。

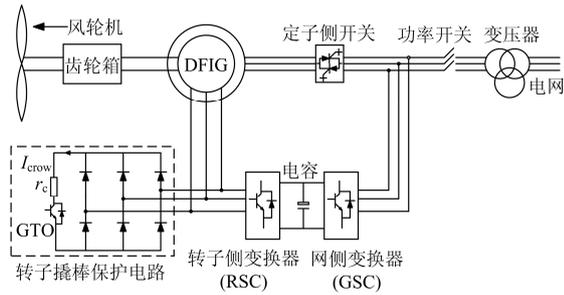


图1 含撬棒保护电路的并网型DFIG发电系统结构图

Fig. 1 Structure of DFIG generating system with Crowbar protection circuit

由三相静止坐标系下的数学模型经旋转坐标变换, 可得DFIG在两相同步旋转坐标系下的数学模型。由于 dq 轴在空间上互相垂直, 两相绕组之间并没有磁的耦合, 故DFIG的数学模型可得到很大程度上的简化, 便于电压跌落故障下的数学分析。在同步旋转 $dq0$ 坐标系下的DFIG数学模型如下。

电压方程^[17]为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_s \psi_{rq} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_s \psi_{rd} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为定、转子侧的 d 轴和 q 轴电压、电流分量; ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为定、转子侧的 d 轴、 q 轴的磁链分量; ω_1 为定子同步旋转角速度, ω_s 为转差频率角速度, ω_r 为转子旋转电角速度, $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ 。

磁链方程^[17]为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_s 、 L_r 分别为同步旋转坐标系下定、转子绕组各自的自感; L_m 为它们之间的等效互感。

2 DFIG机端电压跌落下的暂态分析

在研究电网电压跌落对DFIG系统的影响时, 需要推导出DFIG定子电压和转子电流在电压跌落过程中的暂态数学表达式。由于电网电压跌落情况下DFIG的转子电路被撬棒保护电路所短路, 可以利用电路叠加原理进行分析, 得到在该情况下DFIG的暂态电流表达式。

定子三相电压在低电压故障情况下的跌落过程, 可以等效地看作在定子端施加一组与原端电压方向相反而幅值为电压跌落幅值的过程。设定子短路电流的空间矢量 i_s 为^[18]

$$i_s = i_{s0} + i_{s1} \quad (3)$$

式中: i_{s0} 为定子电压在电压跌落故障发生前的定子稳态电流空间矢量; i_{s1} 为在定子端突然施加反向的三相电压所产生的定子电流空间矢量。

设定子电压的空间矢量为 $u_s = -jU_m e^{j(\omega_1 t + \varphi)}$, 则在转子坐标系中 $u'_s = -jU_m e^{j(\omega_s t + \varphi)}$, 于是得到定子电压跌落前的电流矢量 i'_{s0} 为

$$i'_{s0} = \frac{u'_s}{R_s + j\omega_1 L_s} = \frac{-jU_m e^{j(\omega_1 t + \varphi)}}{R_s + jX_L} \quad (4)$$

式中: R_s 为定子电阻; X_L 为定子电抗, 其中 $X_L = \omega_1 L_s = X_{s\sigma} + X_m$, X_m 为励磁电抗, $X_{s\sigma}$ 为定子漏抗。

再求 i'_{s1} 。在转子坐标系中, 设定、转子的磁链初始值为0。类似于式(4), 采用拉普拉斯变换分析的方法, 可得在定子端突然施加反向的三相电压时, 相应定子电压方程的 s 域表达式为

$$A U'_{s1} = [R_s + (s + j\omega_1) L_s(s)] I'_{s1} \quad (5)$$

式中: A 为电压跌落的程度($0 < A < 1$), 表征电压跌落的大小; $L_s(s)$ 为在同步旋转坐标系下定子侧的运算电感, 其中 $L_s(s) = L_s(1 + sT_r') / (1 + sT_r)$; T_r 和 T_r' 分别

为转子的时间常数和瞬态时间常数, $T_r=L_r/R_r$, $T_r'=L_r'/R_r$ 。

由此可得 I'_{s1} 为

$$I'_{s1} = \frac{jAU_m e^{j\varphi}}{(s-j\omega_s)(\alpha+s+j\omega_1)L_s(s)} \quad (6)$$

式中, α 为定子直流分量部分的衰减系数, 且 $\alpha \approx R_s/L'_s$ 。

将式(6)中的运算电感 $1/L_s(s)$ 展开成部分分式形式, 可得 I'_{s1} 的展开式形式, 并取其拉普拉斯逆变换, 可得 i'_{s1} , 考虑到 $\alpha \ll \omega_r$, $-1/T_r' \ll \omega_r$, $(s+\alpha+j\omega_1) \approx s(s+\alpha+j\omega_r)$, 可将式(6)进行化简。利用电路的叠加定律, 则可得到 i'_s 为

$$i'_s = i'_{s0} + i'_{s1} \quad (7)$$

最后可以得到在定子坐标系中定子电流的空间矢量的时域表达式为

$$i_s = i'_s e^{j\omega_s t} \quad (8)$$

则定子 A 相电流 i_A 为

$$i_A = \text{Re}(i_s) = (A-1) \frac{U_m}{X_s} \cos(\omega_1 t + \varphi) - \frac{AU_m e^{-\alpha t}}{X'_s} \cos \varphi + AU_m \left(\frac{1}{X'_s} - \frac{1}{X_s} \right) e^{-t/T_r'} \cos(\omega_r t + \varphi) \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 定子的 A 相电流由三部分之和组成: 其中, $(A-1)U_m \cos(\omega_1 t + \varphi)/X_s$ 是定子电流的稳态分量部分, 其幅值的大小由电压跌落的深度 A 决定; $AU_m e^{-\alpha t} \cos \varphi / X'_s$ 是暂态故障电流中的直流分量部分, 其幅值大小取决于短路时电压、电流之间的相位角 φ , 且此分量以定子的时间常数 T_a 不断衰减; 而 $AU_m(1/X'_s - 1/X_s)e^{-t/T_r'} \cos(\omega_r t + \varphi)$ 为暂态故障电流中的交流分量部分, 占暂态电流中的大部分, 以瞬态时间常数 T_r' 呈指数衰减变化^[18]。

3 撬棒电路阻值的选择

通过在转子侧加装撬棒保护电路的方法, 即可在电网电压跌落故障的过程中增加发电机的转子电阻, 抑制暂态过程中电流的交流分量部分, 使得 DFIG 系统在低电压故障下能够继续保持并网运行。但是若撬棒电路中的保护电阻阻值的选择不当, 则会导致变流器直流母线上电压的泵升, 因此需要恰当地选择其阻值。为此, 需计算出在电压跌落时, 转子侧电流的时域表达式。

根据定、转子的电压、电流方程式(1)和式(2), 结合式(9)的分析结果, 经旋转坐标变换后可得转子

侧故障电流的时域表达式为^[19]

$$i'_r = \frac{1}{j(L_s L_r - L_m)} \left[\frac{L_s}{s} \sqrt{u_{dr}^2 + u_{qr}^2} e^{j\delta t} + L_m U_s \right] e^{-t/T_r'} + \frac{U_s}{j\omega_s} \left[-\frac{L_m e^{-j(1-s)\omega_s t} e^{-t/T_s'}}{(L_2 + L_m)L'_s} + \frac{e^{-t/T_r'}}{L'_r} \right] \quad (10)$$

与定子 A 相电流类似, 转子侧故障电流也是由转差率电流分量、转子稳态转速频率分量和衰减的直流分量这 3 种频率的电流分量叠加而成。由对式(10)的进一步分析可知, 为抑制转子暂态电流, 撬棒保护电路中的阻值 r_c 的选取将十分重要, r_c 越大, 则转子在低电压故障下的电流就越小; 自然, 功率和转矩振荡的幅值也越小; 但是过大的 r_c 会导致网侧变流器和在转子绕组上产生过电压, 最终导致直流母线上的电压泵升。

当电网发生电压跌落故障时, 将转子侧进行等效。可得图 2 所示的投入撬棒保护电路后的 DFIG 等效电路。图中, U_r 为转子电压, R_r 为转子等效电阻, $L_{r\sigma}$ 和 $L_{r\sigma}$ 分别为定、转子各自的漏感; i_r 为转子电流。为了简化计算过程, 一些对计算结果影响不大的参数可以忽略。

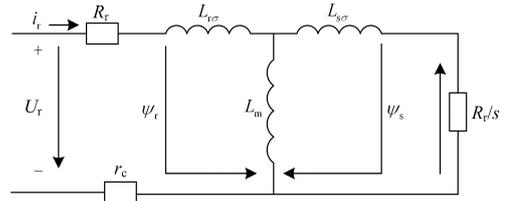


图 2 投入撬棒保护电路后的 DFIG 等效电路

Fig. 2 DFIG equivalent circuit after inputting Crowbar protection circuit

由上所述, 提出撬棒阻值的整定方法如下:

1) 在投入撬棒保护电路后, 转子侧故障电流的最大值应小于转子电流的安全值 I_{fm} , 一般 I_{fm} 取 1.5 p.u. 左右, 于是有

$$\frac{U_r}{\sqrt{X_L^2 + (r_c + R_r)^2}} \leq K_1 I_{fm} \quad (11)$$

据此可计算出 r_c 的最小值, 式中, K_1 为转子电流安全系数, 其中 $K_1=0.9\sim 1.2$, 当电压跌落发生在机端时, K_1 取较小值 0.9; 当电压跌落发生在用户侧时, K_1 取较大值 1.2。

2) 为了避免在投入撬棒保护电路后, 直流母线上出现过电压, 则在投入撬棒电路后, 应满足在 r_c 上的压降小于其阈值电压 U_{dcm} , 一般 U_{dcm} 取 2 p.u. 左右。

$$\frac{\sqrt{3}r_c U_r}{\sqrt{X_L^2 + (r_c + R_r)^2}} \leq K_U U_{\text{dcm}} \quad (12)$$

由此可得 r_c 在整定范围内的最大值, 式中, K_U 为母线电压安全系数, $K_U=0.95\sim 1.3$, 当电压跌落发生在机端时, K_U 取较大值 1.3; 当电压跌落发生在用户侧时, K_U 取较小值 0.95。

3) 由式(11)和式(12)即可得到 r_c 的取值范围为

$$\begin{cases} r_{c_max} \leq \frac{K_U U_{\text{dcm}} X_L}{\sqrt{3U_r^2 - U_{\text{dc}}^2}} - R_r \\ r_{c_min} \geq \sqrt{\left(\frac{U_r}{K_U I_{\text{fm}}}\right)^2 - X_L^2 - R_r} \end{cases} \quad (13)$$

由对式(10)的分析并结合式(13)的结果可得: 在保证网侧变流器不出现过电压的情况下, 若撬棒的阻值整定在该取值范围内且适当地偏大, 则 DFIG 的 LVRT 效果将更好。

4 1.5 MW DFIG 撬棒电路阻值的选择

为了确定合适的撬棒阻值, 对于 1.5 MW 的 DFIG, 在代入不同的 r_c 时, 求得对应的最大短路电流 I_{rmax} 、最大转子电压 U_{rmax} 以及无功功率峰值 Q_{smax} 。其具体计算结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出: 随着撬棒阻值的不断增大, 最大转子电流则逐渐减小, 但转子侧最大电压随之升高。为了避免网侧变流器的直流侧出现过电压, 撬棒阻值的选择应使得在故障过程中满足以下的约束条件: $U_{\text{rmax}} < U_{\text{rlim}}$, 其中 U_{rlim} 为网侧变流器能承受的最大工作电压, 一般标注在产品铭牌上, 对于本文所提 1.5 MW DFIG, $U_{\text{rlim}}=0.57$ p.u.。然而从表 1 中可以看出, 当 $r_c=0.10$ p.u. 时, $U_{\text{rmax}} < U_{\text{rlim}}$ 已不再成立, 因此撬棒的阻值最大不应该超过 0.095 p.u. 左右。

表 1 不同撬棒取值下 I_{rmax} 、 U_{rmax} 和 Q_{smax} 的计算结果

Table 1 Calculation results of I_{rmax} , U_{rmax} and Q_{smax} under different Crowbar resistances

r_c	对应数值(标么值)		
	I_{rmax}	U_{rmax}	Q_{smax}
0.01	8.86	0.081	-1.51
0.03	7.92	0.161	-1.65
0.05	6.89	0.345	-1.77
0.07	6.15	0.490	-1.93
0.09	5.98	0.535	-2.15
0.10	5.77	0.577	-2.46

5 仿真分析

为验证上述撬棒阻值整定的合理性, 在 Matlab

软件中使用 Simulink 工具箱中的相关元件, 构建了 1.5 MW 的 DFIG 仿真结构模型。其中, DFIG 机端母线经 575 V/25 kV 的变压器与 20 km 长三相 π 形输电线路相连, 后经 25 kV/120 kV 的变压器以及 120 kV 汇流母线并入系统。DFIG 参数值均折算到定子侧。定子额定功率 $P_s=1.5$ MW, 定子额定电压 $U_{\text{SN}}=690$ V, 定子电压频率 $f_1=50$ Hz, 定子漏感 $L_{\text{ls}}=55.8$ μH , 转子漏感 $L_{\text{lr}}=44.65$ μH , 定、转子之间互感 $L_m=1.73$ mH, 定、转子电阻 $R=2.1$ m Ω , 进线电阻 $R_g=0.01$ Ω , 进线电感 $L_g=0.5$ mH, 直流电容 $C=7.5$ mF; π 形线路的参数 $[R, L, C]$ 为 $[0.2568, 2 \times 10^{-3}, 8.6 \times 10^{-9}]$ ($\Omega, \text{H}, \text{F}$)/km。

依据算例分析的结果, 分别选取 r_c 为 0.075 p.u.、0.085 p.u. 两个典型值, 对撬棒阻值投入后相应的转子侧电流 I_r 、定子无功功率 Q_s 和机端电压 U_s 进行仿真, 仿真结果如图 3 所示。

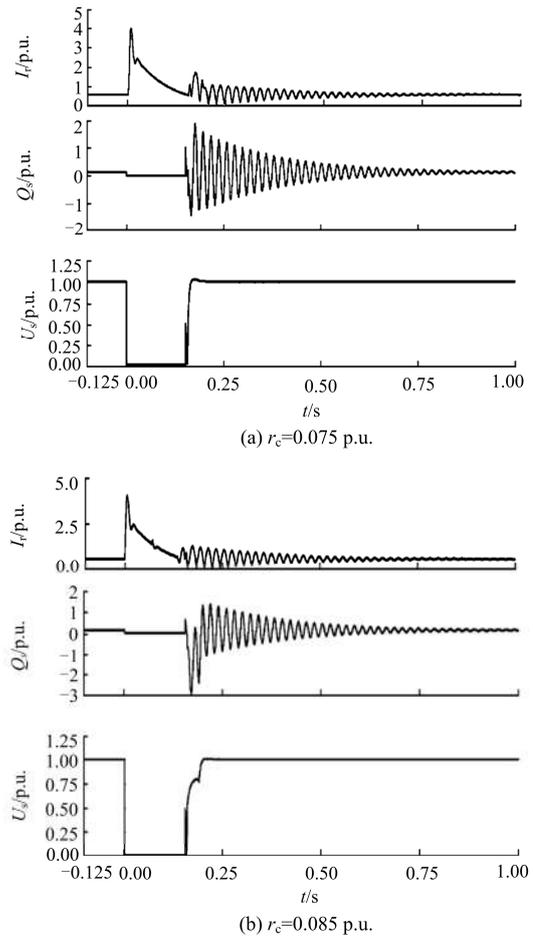


图 3 不同 r_c 取值下 DFIG 相应的 I_r 、 Q_s 和 U_s 仿真波形图

Fig. 3 Simulation results of I_r , Q_s and U_s under different Crowbar resistance

从图中可以看出, 故障发生后 $r_c=0.075$ p.u. 时,

最大的转子端电流为 4.15 p.u., 而当 $r_c=0.085$ p.u. 时, 转子端电流仅为 3.80 p.u. 左右, 故障在切除后转子端电流脉动较小, 且可以更快地趋于稳定。在低电压故障切除后, DFIG 从电网吸收的最大瞬时无功功率分别为 1.85 p.u. 和 3.00 p.u.。较小的撬棒阻值会使转子暂态过程电流的幅值更大, 但为维持机端电压, 故障初期需要向系统馈送更大的无功。而较大的阻值会抑制故障期间功率的振荡。综合算例及仿真分析结果, 建议在工程实际中, 在撬棒阻值能够有效抑制住转子过电流的基础上, 其阻值应适当偏大。

6 实验验证

为验证所提撬棒阻值的整定方法和算例、仿真结果的合理性, 搭建了额定功率为 10 kW 的小功率实验系统, 在撬棒阻值的不同取值下进行了相关实验, 主电路结构按图 1 所示搭建。图中, 发电机定子端通过升压变压器与电网端相连, 当正常并网发电时, 转子侧与双 PWM 变换器相连; 当使用电压跌落故障发生器模拟电压跌落故障时, 则与撬棒保护电路相连接, 通过控制全控管的导通与关断即可实现对撬棒电阻的投切。主电路图中 DFIG 的具体参数如表 2 所示。

表 2 10 kW DFIG 参数
Table 2 10 kW DFIG parameters

电机参数	数值(有名值)	数值(标么值)
定子电压 V_{dc}/V	690	1
转子电阻 R/Ω	0.105 0	0.007 3
定子电阻 R/Ω	0.105 0	0.007 3
定子漏感 L/H	0.003 2	0.068 0
定子漏感 L/H	0.003 4	0.732 0
定、转子互感 L/H	0.210 0	0.014 6

结合算例分析的结果, 在本实验中选取了 r_c 为 0.085、0.086、0.087、0.088、0.089、0.090 p.u. 六种情况, 其相应 DFIG 的 I_{rmax} 、 U_{rmax} 以及 Q_{smax} 的实验结果如表 3 所示。

表 3 不同撬棒取值下的 I_{rmax} 、 U_{rmax} 和 Q_{smax} 实验结果
Table 3 Experiment results of I_{rmax} , U_{rmax} and Q_{smax} under different crowbar resistances

r_c	对应数值(标么值)		
	I_{rmax}	U_{rmax}	Q_{smax}
0.085	6.13	0.492	-1.975
0.086	6.11	0.500	-1.982
0.087	6.09	0.530	-1.998
0.088	6.08	0.453	-2.050
0.089	6.06	0.538	-2.150
0.090	6.04	0.540	-2.202

对比表 1 和表 3 的相关数据即可看出, 不同的撬棒阻值下 DFIG 的各个参数的变化趋势一致, 使用所提撬棒阻值整定方法的算例分析与实验结果能够互相验证。由此验证该阻值整定方法的正确性, 以及在所提阻值的整定范围内, 撬棒阻值越大则对转子侧过电流的抑制效果就越明显的结论。

7 结论

从空间矢量的角度出发, 运用拉氏变换法分析了 DFIG 风力发电系统在机端电压跌落下的暂态特性; 通过在转子侧加装撬棒保护电路可以在电网电压跌落时增加发电机的转子电阻, 避免直流母线电压的泵升和转子侧出现过电流, 可以有效抑制暂态过程中的故障分量。考虑到各电量和机械量在故障暂态过程中的剧烈和快速变化, 在合理的取值范围内, 撬棒阻值越大, 则对转子侧过电流的抑制效果就越明显。但撬棒的阻值不能过小, 以削弱故障期间电磁转矩的振荡幅度, 减小对 DFIG 机械传动部件的损伤。

参考文献

- [1] 王定国, 张红超. 双馈型风力发电机低电压穿越的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 70-73.
WANG Dingguo, ZHANG Hongchao. Study on low voltage ride through of doubly fed wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 70-73.
- [2] LOPEZ J, GUBIA E. Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4246-4254.
- [3] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Research and analysis of low voltage ride through control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [4] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.
QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Simulation study on fault characteristics of cluster access wind farm with low voltage ride through capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [5] 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.
HE Yikang, HU Jiabing. Several hot issues in grid

- connected operation of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.
- [6] 车倩, 陆于平. 采用 Crowbar 实现低电压穿越的风电场继电保护定值整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 97-102.
CHE Qian, LU Yuping. Research on wind farm relay protection value setting based on Crowbar circuit LVRT technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 97-102.
- [7] 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, 30(22): 29-36.
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, 30(22): 29-36.
- [8] 李啸骢, 黄维, 黄承喜, 等. 基于 Crowbar 保护的双馈风力发电机低电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 67-71.
LI Xiacong, HUANG Wei, HUANG Chengxi, et al. Study on low voltage control strategy of doubly fed wind power generator based on Crowbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 67-71.
- [9] 张艳霞, 童锐, 赵杰, 等. 双馈风电机组暂态特性分析及低电压穿越方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 7-11.
ZHANG Yanxia, TONG Rui, ZHAO Jie, et al. Transient characteristics analysis and low voltage ride-through scheme of doubly-fed wind turbine generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 7-11.
- [10] 周士琼, 王倩, 吕潇, 等. 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 33-39.
ZHOU Shiqiong, WANG Qian, LÜ Xiao, et al. Low voltage ride through control strategy of doubly fed wind power generation system based on stator Crowbar circuit mode switching[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.
- [11] 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.
ZHU Xiaodong, SHI Lei, CHEN Ning, et al. Considering the crowbar resistance and exit time of DFIG low voltage ride through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 84-89.
- [12] 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.
WEI Lan, CHEN Yuchen, CHEN Guocheng, et al. Theoretical analysis and experimental research on low voltage ride through control strategy of doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 30-36.
- [13] 胡书举, 赵栋利, 赵斌, 等. 双馈风电机组低电压穿越特性的试验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 789-795.
HU Shuju, ZHAO Dongli, ZHAO Bin, et al. Experimental study on low voltage ride through characteristics of doubly fed induction generator[J]. High Voltage Technology, 2010, 36(3): 789-795.
- [14] 王振树, 刘岩, 雷鸣, 等. 基于 Crowbar 的双馈机组风电场等值模型与并网仿真分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 44-51.
WANG Zhenshu, LIU Yan, LEI Ming, et al. Doubly-fed induction generator wind farm aggregated model based on Crowbar and integration simulation analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 44-51.
- [15] 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.
ZHANG Chen, LI Zheng, CAI Xu, et al. An active low voltage ride through strategy of DFIG based wind turbine using stator series impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2943-2951.
- [16] 熊威, 邹旭东, 黄清军, 等. 基于 Crowbar 保护的双馈感应发电机暂态特性与参数设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 117-125.
XIONG Wei, ZHOU Xudong, HUANG Qingjun, et al. Transient characteristics and parameter design of doubly fed induction generator based on Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 117-125.
- [17] 王毅, 朱晓荣, 赵书强. 风力发电系统的建模与仿真[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [18] 李建林, 徐洪华. 风力发电系统低电压穿越运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [19] 方泽钦, 杨俊华, 陈思哲, 等. Crowbar 保护电路参数选择对双馈风电系统低电压穿越的影响[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(8): 73-79.
FANG Zeqin, YANG Junhua, CHEN Sizhe, et al. Effect of Crowbar protection circuit parameter selection on the low voltage ride through of doubly fed wind power system[J]. Electric Machine and Control Applications, 2016, 43(8): 73-79.

收稿日期: 2017-04-29; 修回日期: 2017-06-21

作者简介:

李圣清(1961—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统谐波的分析与治理、电力电子技术及新型输变电技术;

E-mail: lsq1961@sohu.com

明 瑶(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为双馈型风力发电系统中的低电压穿越技术。E-mail: mingyao003@163.com

(编辑 魏小丽)