

DOI: 10.7667/PSPC171646

改善双馈感应发电机无功特性的变阻值撬棒保护方案

邹志策¹, 雷一², 欧然¹, 宗哲东¹

(1. 国网重庆市电力公司江北供电分公司, 重庆 401147; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610200)

摘要: 撬棒保护的接入及其电阻值会改变低电压穿越期间双馈感应发电机(DFIG)的无功功率动态特性, 由此将影响风电场周边区域电网电压稳定性。针对这一问题, 详细分析不同电网电压跌落水平和低电压过渡不同时期撬棒保护接入对 DFIG 无功特性的影响机理及其变化规律。提出了一种改善机组无功特性的变阻值撬棒保护方案, 制定了该方案的撬棒阻值整定方法及其投切控制策略, 并进行仿真对比研究。仿真结果表明, 相比以限流为目标的传统撬棒保护和以尽快恢复机组可控性的主动式撬棒保护, 所提撬棒保护方案不仅能在故障持续期间缩短撬棒投入时间, 减少撬棒投入期间 DFIG 吸收的无功功率, 提升出口电压。同时也能最大限度降低故障切除时的 DFIG 无功振荡峰值, 加速电网电压恢复, 有助于系统区域电压稳定性的提升。

关键词: 双馈感应发电机; 低电压穿越; 撬棒保护; 动态变阻值; 无功功率特性

Crowbar protection scheme based on dynamic resistance for reactive power improvement of doubly fed induction generator

ZOU Zhice¹, LEI Yi², OU Ran¹, ZONG Zhedong¹

(1. State Grid Chongqing Jiangbei Power Supply Company, Chongqing 401147, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610200, China)

Abstract: The activation of crowbar protection and its resistance value will alter the reactive power dynamic characteristics of Doubly Fed Induction Generator (DFIG) during the Low Voltage Ride Through (LVRT) period, which will affect the wind farm district grid voltage stability. To solve this problem, the influence mechanism of the crowbar protection on DFIG reactive characteristics and its variation law under different grid voltage sags and low voltage transition periods are analyzed in detail. Then, a novel crowbar protection scheme based on dynamic resistance for reactive power improvement of DFIG is proposed. And the corresponding crowbar resistance setting method and switching control strategy are established. Finally, the comparative studies are carried out. Simulation results show that compared with the traditional crowbar protection for current limitation and the active crowbar protection for generator controllability recovery, the proposed crowbar protection scheme can shorten the activation time of the crowbar, reduce the reactive power absorbing, and improve the terminal voltage of the DFIG during the fault. It can also minimize the oscillation peak values of the reactive power, and consequently accelerate the grid voltage recovery after clearing the fault, which is helpful for enhancement of the system district voltage stability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577096 and No. 51761135015).

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); low voltage ride through (LVRT); crowbar protection; dynamic resistance; reactive power characteristics

0 引言

双馈感应发电机(DFIG)以其灵活高效的性能在

风电领域应用广泛^[1-2]。电网发生故障时, 目前商用兆瓦级 DFIG 风电机组通常采用转子侧撬棒(Crowbar)保护技术来保护机组并实现低电压穿越(LVRT)^[3-5]。但撬棒保护的接入会闭锁 DFIG 转子侧变流器, 致使机组异步运行从电网吸收大量无功功率励磁^[6-7], 由于故障系统此刻也需要大量无功功率

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577096, 51761135015)

以支撑故障电网电压的快速恢复,无功功率的不足势必会恶化系统区域电压稳定性,在高比例风电并网时对电网安全稳定不利^[8-10]。因此,研究低电压过渡时撬棒保护对DFIG无功特性的影响进而设计改善机组无功特性的撬棒保护方案,有助于系统低电压穿越性能和区域电压稳定性的提升^[7,9-14]。

国内外已对撬棒保护投入后DFIG无功功率问题进行了大量研究^[7,9-17]。文献[9-11]指出,增大撬棒阻值可减少机组异步运行吸收的无功功率,但未揭示其内在影响机理。文献[12]分析DFIG脱网时对电网的无功需求,给出了机组异常脱网时故障持续期间的转差-无功特性,但未分析故障发生和切除瞬间撬棒接入时DFIG的无功响应特性。文献[13]分析DFIG的暂态无功特性,但给出的撬棒切除策略为故障切除后1~2周波,致使在故障切除后带撬棒运行的DFIG会从电网吸收大量无功功率,延缓电网电压的恢复;为此,文献[14]提出基于无功判定法的撬棒保护切除控制策略。但上述研究未对故障持续期间带撬棒运行的DFIG无功特性进行改善。文献[15-16]提出改善故障持续期间DFIG无功特性的投切策略,但未分析故障切除时机组的无功特性。且前述文献均采用固定撬棒电阻值,无法向故障电网提供有效的无功支撑。文献[17]提出了一种撬棒并联动态电阻的撬棒保护结构以兼顾转子过电流和直流侧过电压的抑制,但并联动态电阻的投入会减小撬棒等效电阻,导致DFIG异步运行从电网吸收更多无功功率,不利于电网电压的稳定。

实际上,当电网电压不完全跌落时转子电流峰值较小,且故障发生后的过渡期电流峰值会得到有效衰减,适当增大撬棒阻值有利于减小故障持续期间发电机异步运行吸收的无功功率。本文基于低电压过渡时DFIG的无功特性,详细分析撬棒保护接入对DFIG无功特性的影响机理及其变化规律,提出了一种改善机组无功特性的新型变阻值撬棒保护结构,及其撬棒阻值整定方法和投切控制策略。与传统撬棒保护方案和主动式撬棒方案的对比仿真研究结果,验证了新型变阻值撬棒保护方案的技术可行性和有效性。

1 低电压过渡时DFIG无功特性

图1给出了电网低电压故障时典型的DFIG定子无功功率动态响应曲线。可知,故障发生前,机组稳态运行,为充分利用机组变流器容量最大化实现风能转换,DFIG定子多工作于单位功率因数,DFIG定子向电网输出无功功率为零,即 $Q_s = 0$;当 t_0 时刻电网发生故障瞬间,DFIG定子电压降低,

DFIG逐步过渡到较低的电压下运行,导致机组主磁场失磁,机组定子向电网馈入大量无功功率,出现图1中 t_0-t_1 间的正向无功输出峰值;故障持续期间,故障发生瞬间产生的无功振荡峰值得到充分衰减,机组定子输出无功响应与机组转子保护结构及相应的控制策略有关;当 t_2 时刻故障切除时,电网电压恢复,机组逐步过渡到初始稳态电压下运行,从电网吸收大量的无功功率以恢复机组励磁,如图1中 t_2-t_3 间的反向无功振荡峰值;当 t_3 时刻故障切除引起的功率振荡完全衰减时,机组输出无功功率再次为零。

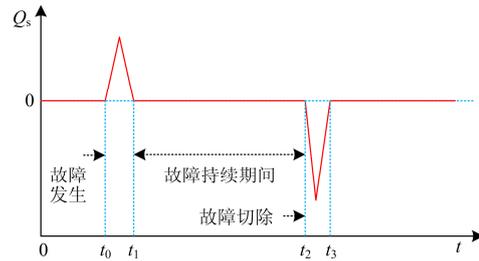


图1 DFIG定子无功功率动态响应曲线

Fig. 1 Curve of DFIG stator reactive power behaviors

图2给出了不同机端电压跌落水平下DFIG定子无功功率动态特性(具体仿真条件见4.1节)。可知,机端电压跌落程度越大(机端残压 U_s 越小),故障发生瞬间,机组失磁越严重,向电网馈入的无功功率越多,正向振荡峰值也越大;故障持续期间,单位功率因数下,机组自身无功动态响应特性基本相似,但随着机端电压 U_s 增大,机组向电网馈入的无功功率略有增加;故障切除时,机端电压越大,机组恢复励磁所需要吸收的无功功率也越少,反向振荡峰值也越小。可见,DFIG机端电压跌落越严重,由于机端低电压的限制,故障持续期间DFIG自身激励响应下基本不向电网输出无功功率,且故障发生和故障切除时,机组无功功率振荡峰值越大,更不利于电网电压稳定。

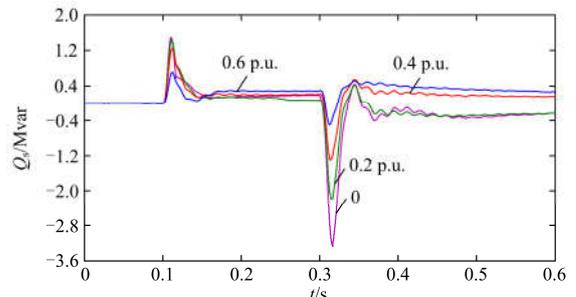


图2 不同机端电压跌落下的定子无功功率动态特性

Fig. 2 Stator reactive power behaviors under different stator voltage dips

2 撬棒保护对 DFIG 无功特性影响分析

2.1 低电压过渡撬棒保护方案

文献[3-4, 7]给出了一种常用的双馈风电系统撬棒保护。其中, 撬棒电路由反并联可控晶闸管和限流电阻 R_{cb} 构成。其工作原理是: 一旦检测到转子电流或直流侧电压增大到预设的保护阈值, 就迅速触发开关器件使其导通, 同时封锁转子侧变流器驱动脉冲, 利用限流电阻旁路转子侧变流器, 并为转子过电流提供衰减回路。但撬棒保护的接入会改变 DFIG 转子结构, 机组运行于异步电机状态, 致使 DFIG 从电网吸收大量无功功率进行励磁, 这将进一步恶化电网电压, 威胁电网安全稳定。

2.2 撬棒接入后 DFIG 无功功率特性分析

电网发生三相短路故障且撬棒投入时, 机组总无功功率 Q_s 可近似由主磁场快速衰减向电网发出无功功率 Q_+ 和 DFIG 异步运行从电网吸收无功功率 Q_- 两部分叠加组成。根据 DFIG 暂态电流方程, 可得撬棒接入后 DFIG 发出、吸收的无功功率 Q_+ 和 Q_- 的解析表达式分别为^[13]

$$Q_+ \approx \frac{U_1^2 X_g}{X_s^2} \left[(\sigma - 1) e^{-t/(\sigma\tau_r)} \cos(\omega_s t + \alpha) + e^{-t/(\sigma\tau_s)} \cos \alpha \right]^2 \quad (1)$$

$$Q_- = \left[\frac{U_s^2}{(R_s + R_r/s)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2} \right] \cdot (1 - e^{-t/\tau_a})^2 (X_{sl} + X_{rl}) \quad (2)$$

其中, α 和 τ_a 分别为

$$\alpha = \varphi_0 + \arctan [1/(\sigma\tau_r\omega_r)] \quad (3)$$

$$\tau_a = (L_g + L_{sl} + L_{rl}) / (R_g + R_s + R_r/s) \quad (4)$$

式中: U_1 为定子稳态电压幅值; U_s 为电网等值残压; R_g 和 L_g 分别为电网等值电阻和电感; X_s 为定子电抗; R_s 、 R_r 、 X_{sl} 、 X_{rl} 、 L_{sl} 、 L_{rl} 分别为定、转子电阻、漏抗和漏感; $\tau_s = \sigma L_s / R_s$ 为定子衰减时间常数; $\tau_r = \sigma L_r / (R_s + R_{cb})$ 为转子衰减时间常数; $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ 为漏感系数; R_{cb} 为撬棒电阻; s 为转差率; ω_s 和 ω_r 分别为定、转子角频率。

由式(1)和式(2)可知, 故障发生瞬间, 残压 U_s 相对较小, $Q_- \ll Q_+$, Q_s 主要由 Q_+ 组成, DFIG 发出大量无功, 有力地支撑了电网电压, 不过 Q_+ 以 τ 快速衰减, 随后 DFIG 异步运行而开始从电网吸收无功。同样地, 故障切除后, 电压 U_s 得到恢复, Q_- 增大, 主导着 Q_s , DFIG 开始从电网吸收大量无功, 对电网恢复相当不利。且撬棒投入后, 衰减时间常数 τ_r 和 τ_a 均减小, 会加速故障发生瞬间和故障

切除瞬间 DFIG 无功衰减, 无功振荡峰值也更小。

当 Q_+ 得到有效衰减后, DFIG 以异步电机模式运行于故障稳态。图 3 给出了撬棒保护接入后 DFIG 异步运行状态的等值电路。图中: 转子等效电阻 R_Σ 包括撬棒电阻 R_{cb} 和转子电阻 R_r 。

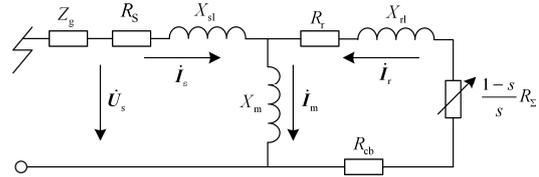


图 3 撬棒保护接入后 DFIG 异步运行状态的等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of asynchronous operational DFIG with crowbar action

从图 3 中 DFIG 定子侧看过去, 其等值电路总阻抗为

$$Z_\Sigma = R + jX = (R_s + jX_{sl}) + jX_m // (R_\Sigma/s + jX_{rl}) \quad (5)$$

式中, R 和 X 分别为

$$\begin{cases} R = R_s + \frac{(R_\Sigma/s)X_m^2}{(R_\Sigma/s)^2 + (X_m + X_{rl})^2} \\ X = X_{sl} + \frac{(R_\Sigma/s)^2 X_m + (X_m + X_{rl})X_{rl}X_m}{(R_\Sigma/s)^2 + (X_m + X_{rl})^2} \end{cases} \quad (6)$$

忽略暂态电流的影响, 可得故障持续期间 DFIG 异步运行其定子侧从电网吸收的无功功率为

$$Q_s = \text{Im}(S_f) = \text{Im}\left(-\frac{3}{2} \dot{U}_s \dot{I}_s^*\right) = -\frac{3}{2} \dot{U}_s^2 \frac{X}{R^2 + X^2} \quad (7)$$

式中: S_f 为故障稳态运行时机组定子输出视在功率; * 表示共轭运算。

分析式(7)可知, DFIG 异步运行时其定子侧从电网吸收的无功功率与故障后机端等值残压 U_s 、机组等效阻抗参数 R 和 X , 以及转差率 s 有关。图 4 给出了机端等值残压 U_s 分别为 0.2 p.u. 和 0.4 p.u. 时, DFIG 定子吸收无功功率随撬棒阻值和转差率的变化规律。

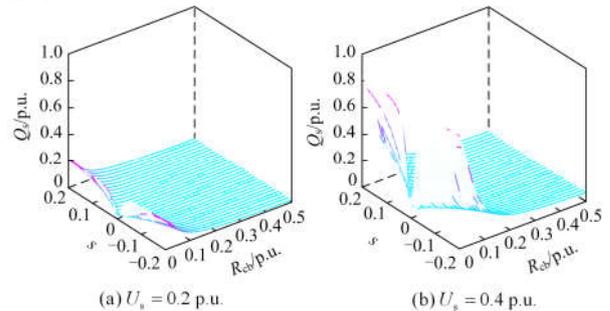


图 4 定子吸收无功功率随撬棒阻值和转差率的变化规律

Fig. 4 Variation of absorbed stator reactive power under different R_{cb} and s

分析图 4 可知, 当 U_s 增大 1 倍时, 定子吸收无功功率 Q_s 增大 3 倍, 即残压越高, DFIG 异步运行吸收的无功功率越多。当撬棒阻值 R_{cb} 一定时, DFIG 吸收无功功率随着转差率 s 由 0.2 至 -0.2 变化而先减小后增大, 当 $s=0$ 时, Q_s 最小。即, 异步运行时, 机组转速越小或越大, 定子吸收的无功功率越多; 机组越接近同步速运行, 定子吸收的无功功率越少。说明 DFIG 定子吸收无功功率与转差率绝对值正相关。当转差率 s 为非零值且一定时, R_{cb} 越大, DFIG 异步运行吸收的无功功率越少。即 DFIG 定子吸收无功功率与撬棒阻值负相关。

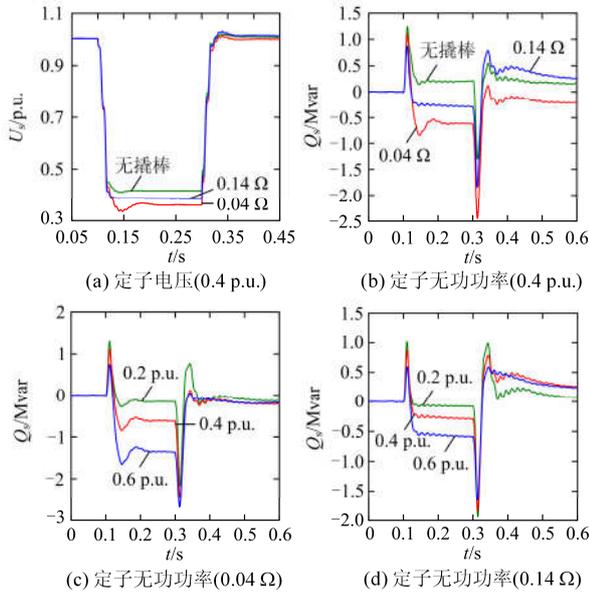


图 5 定子电压无功动态响应特性

Fig. 5 Stator voltage and reactive power behaviors

图 5(a)和图 5(b)给出了 U_s 为 0.4 p.u.时, 不同撬棒阻值 R_{cb} 下 DFIG 定子电压和无功功率动态响应特性。可见, 较之撬棒不投入, 故障发生瞬间, 撬棒投入会加速主磁场失磁向电网馈入无功功率的衰减, 故障瞬间发电机向电网馈入的正向无功振荡峰值有所减小; 故障持续期间, 撬棒投入后机组异步运行从电网吸收无功功率, 导致与无撬棒投入时的定子电压相比, 撬棒投入后的机组定子电压会降低; 故障切除时, 因撬棒的投入会进一步拉低故障持续期间的定子电压, 机组恢复正常励磁需要从电网吸收更多的无功功率, 导致机组恢复励磁吸收的反向无功功率振荡峰值相比无撬棒投入时的也更大。当撬棒阻值 R_{cb} 由 0.04 Ω 增大为 0.14 Ω 时, 故障发生和切除瞬间的无功振荡峰值减小, 故障持续期间机组吸收无功更少, 定子电压也有所提高, 与前述理论分析相吻合。可见, 撬棒保护的接入及其电阻值

会影响故障不同时期 DFIG 的电压无功特性。

图 5(c)和图 5(d)给出了 R_{cb} 分别为 0.04 Ω 和 0.14 Ω 时, 不同机端残压 U_s 下 DFIG 定子无功动态响应特性。可见, 当撬棒阻值相同时, 故障后机端残压越大, 故障持续期间, DFIG 异步运行从电网吸收的无功功率越多, 对电网电压的影响越严重。且撬棒阻值较小时, 残压越大, 故障持续期间机组吸收的无功功率越多, 故障切除时机组恢复励磁从电网吸收的无功功率振荡峰值也越大。可见, 故障后机端残压会影响撬棒投入后 DFIG 定子电压无功特性。

3 改善 DFIG 无功特性的撬棒保护设计

3.1 改善无功特性的撬棒电路结构和阻值整定

以限流为目标的传统撬棒阻值整定方法, 采用机端三相电压完全跌落时所评估的转子电流峰值和直流母线过电压限值对撬棒阻值进行选取^[4,13], 即在保证转子线电压峰值不超过直流母线电压的情况下, 撬棒电阻尽量选较大值。从而, 撬棒阻值选取约束条件为

$$U_{r,m} = I_{r,m} R_{cb} \quad (8)$$

$$R_{cb} \leq \frac{U_{dc,lim}}{I_{r,m}} \quad (9)$$

式中: $I_{r,m}$ 为转子电流峰值; $U_{r,m}$ 为转子电压峰值; $U_{dc,lim}$ 为直流侧过电压限值。

当电网电压不完全跌落时, 转子电流峰值小于三相电压完全跌落时的转子电流峰值, 相同直流侧耐压约束下的撬棒阻值可选取更大的阻值^[3,18]。且故障发生后较短时间内, 转子暂态电流峰值得到有效衰减, 适当增大撬棒阻值同样有利于减小故障持续期间机组异步运行吸收的无功功率。因此, 可考虑采用变阻值撬棒保护结构, 以改善不同电压跌落程度和不同故障过渡期机组无功响应特性。

图 6 给出了含改善无功特性的变阻值撬棒保护的双馈风电系统拓扑。其中, 电阻 R_1 和全控型反并联晶闸管 S_1 串联即构成传统撬棒保护; 在传统撬棒回路中串入并联的动态变阻值电阻 R_2 和全控型反并联晶闸管 S_2 即构成改善 DFIG 无功特性的变阻值撬棒保护。稳态运行时, 晶闸管 S_2 导通, 变电阻 R_2 被旁路; 晶闸管 S_1 截止, 整个改进撬棒电阻与转子回路断开。

图 7 给出了 U_s 为 0.4 p.u.时, 不同 s 下定子吸收无功功率随撬棒阻值的变化规律。可见, 当转差率 s 由 -0.2 至 -0.05 变化时, 相同当量的撬棒阻值增大会使机组异步运行吸收的无功功率减少得更多。即, 机组转速越大, 撬棒阻值对机组无功的影响越

单位功率因数模式。为了验证前文理论分析和本文所提方案的有效性, 分别对故障时采用以限流为目标的传统撬棒保护方案(方案 1)^[13,20]、采用以尽快恢复机组可控性的主动式撬棒保护方案(方案 2)^[15-16]和采用改进的以改善 DFIG 无功特性为目标的变阻值撬棒保护方案(方案 3)三种情况进行了仿真比较和分析。

仿真模型中, 方案 1: 当转子电流 I_r 大于动作阈值 I_{rth} 时, 投入撬棒, 直到故障切除后第 2 个周波切除撬棒。方案 2: 当 I_r 大于 I_{rth} 时, 投入撬棒, 闭锁转子侧变流器; 撬棒投入后, 为尽快恢复转子励磁从而对故障电网进行支撑, 当 I_r 小于 I_{rre} , 且保持 $2\pi(1-s)\omega_s$ 时, 切除撬棒, 重启转子侧变流器。方案 1 和方案 2 中撬棒阻值均取为 0.14Ω ^[4]。方案 3: 根据前文定子无功功率动态变化规律, 为能够依据 Q_s 有效划分故障持续期和故障切除时刻, 设定值 Q_{sre1} 和 Q_{sre2} 分别取为 -0.05 Mvar 和 -0.5 Mvar 。时间参数 Δt 取 0.01 s , $\Delta t'$ 取 0.005 s 。三种方案中, 撬棒动作阈值 $I_{rth} = 2.0 \text{ p.u.}$, 返回值 $I_{rre} = 1.9 \text{ p.u.}$ 。

4.2 性能评估

仿真时间为 $0\sim 1 \text{ s}$, 考虑第 $0.1 \text{ s}\sim 0.3 \text{ s}$ 时, 双馈风电系统并网点发生三相短路故障, DFIG 机端电压跌落至 0.4 p.u. 。图 9 给出了在方案 1、2、3 作用下, DFIG 的定子电压和无功功率的动态响应波形曲线。

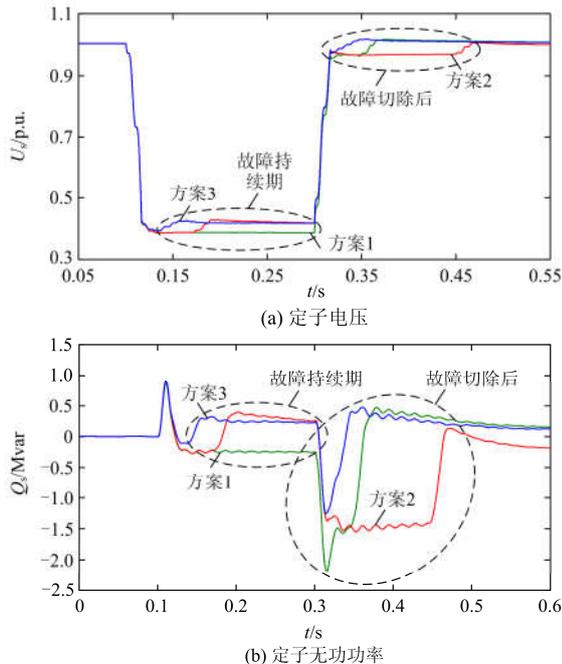


图 9 不同方案下定子电压和无功功率动态响应特性
Fig. 9 Stator voltage and reactive power behaviors under different schemes

由图 9 可知, 故障持续期间, 当采用方案 1 时, DFIG 异步运行从电网吸收 0.27 Mvar 的无功功率, 致使 DFIG 定子电压跌落至 0.38 p.u. , 无疑会对 DFIG 系统电压安全稳定造成严重影响; 当采用方案 2 时, 定子吸收无功的趋势在 0.18 s 随着撬棒的切除而改变, 相应的定子电压也在 0.19 s 提升至 0.42 p.u. , 这在一定程度上缓解了故障持续期间 DFIG 无功电压问题; 当采用方案 3 时, DFIG 吸收的无功功率由上述方案的 0.27 Mvar 减小为 0.11 Mvar , 无功吸收趋势提前至 0.14 s 结束, 定子电压也在 0.15 s 由 0.39 p.u. 提升至 0.42 p.u. , 说明本文变阻值撬棒方案能更好地改善故障持续期间撬棒保护投入时 DFIG 风电并网系统的电压无功稳定性。

图 10 给出了三种方案的撬棒触发信号。可知当电网故障在 0.3 s 切除时, 由于方案 1 滞后故障切除时刻两个周波切除, 定子电压恢复后, DFIG 异步运行从电网吸收的无功功率由故障持续期间的 0.27 Mvar 急剧增大为 2.18 Mvar , 对电网恢复相当不利, 导致定子电压被限制在 0.968 p.u. , 直到 0.365 s 才恢复正常; 当采用方案 2 时, 虽然故障切除瞬间 DFIG 恢复励磁吸收的无功功率反向振荡峰值由传统撬棒下的 2.18 Mvar 减小为 1.55 Mvar , 但故障切除时撬棒的再次投入导致 DFIG 无功功率的吸收时间延长至 0.45 s , 相应的定子电压也在 0.47 s 才恢复正常, 严重降低电网电压恢复速度, 恶化电网电压稳定; 当采用本文所提出的方案 3 时, 撬棒变阻值工作模式下, 故障切除瞬间, 无功反向振荡峰值减小至 1.25 Mvar , 且撬棒采用检测无功吸收增大到一定设定值作为撬棒切除的判据, 0.32 s 时即切除撬棒, 定子电压也在 0.34 s 时恢复正常, 极大地提高了电网电压的恢复速率。

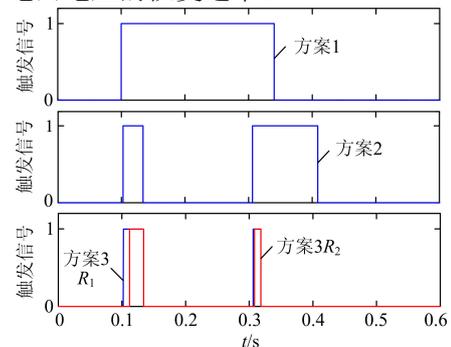


图 10 撬棒触发信号
Fig. 10 Activation of crowbars

综上所述, 相比传统撬棒保护方案和主动式撬棒保护方案, 本文所提方案不仅能最大化减少撬棒投入期间 DFIG 无功功率的吸收, 提升故障持续期

间 DFIG 定子电压, 同时也能降低故障切除时的 DFIG 无功振荡峰值, 加速电网电压恢复, 证明了本文方案的有效性。

5 结论

1) 撬棒保护的接入及其电阻值会影响故障不同时期 DFIG 定子的无功特性。故障发生和故障切除瞬间, 撬棒的接入及其阻值增大会加速 DFIG 无功衰减, 减小无功振荡峰值。故障持续期间, DFIG 异步运行其定子从电网吸收的无功功率与故障后机端等值残压和转差绝对值正相关, 与撬棒阻值负相关。

2) 传统撬棒阻值整定方法采用三相电压完全跌落时的转子电流峰值来整定撬棒阻值, 而电网电压不完全跌落或故障持续期间转子电流峰值得到有效衰减时, 所得固定撬棒阻值过小, 无法向故障电网提供有效的无功支撑, 适当增大撬棒阻值有利于减小故障持续期间和故障切除瞬间机组异步运行吸收的无功功率。

3) 相比传统撬棒保护方案, 本文所提变阻值撬棒保护方案不仅能有效缩短故障持续期间撬棒工作时间, 减少带撬棒运行 DFIG 吸收的无功功率, 支撑定子电压, 同时也能最大限度降低故障切除时的 DFIG 无功振荡峰值, 加速电网电压恢复, 有助于提升风电场周边区域电网电压稳定性。

参考文献

- [1] 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. Control strategy of low voltage ride-through for doubly-fed wind generator with the stator crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.
- [2] 朱晓荣, 刘世鹏. 电网电压不对称跌落时 DFIG 的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 71-78.
ZHU Xiaorong, LIU Shipeng. A control strategy of DFIG under unbalanced voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 71-78.
- [3] 邹志策, 肖先勇, 刘阳, 等. 考虑撬棒保护接入的双馈感应发电机转子磁链动态特性[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 22-29.
ZOU Zhice, XIAO Xianyong, LIU Yang, et al. Rotor flux dynamic characteristics of doubly-fed induction generator with crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 22-29.
- [4] 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.
- [5] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 不同撬棒保护投入时刻下双馈风电机组短路电流计算分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 109-117.
WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbine considering different crowbar protection insertion time[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 109-117.
- [6] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 9-16.
BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 9-16.
- [7] LIANG Jiaqi, QIAO Wei, HARLEY R G. Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 836-843.
- [8] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 78-85. DOI: 10.1186/s41601-016-0018-9.
- [9] HANSEN A D, MICHALKE G. Fault ride-through capability of DFIG wind turbines[J]. Renewable Energy, 2007, 32(9): 1594-1610.
- [10] 刘瑞叶, 陈雯. 故障条件下的风电场无功协调控制策略[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(6): 50-54.
LIU Ruiye, CHEN Wen. A reactive power coordinated control strategy during fault of wind farms[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(6): 50-54.
- [11] 聂暘, 谷昱君, 孟庆功, 等. 提高双馈感应发电机无功支撑能力的低电压穿越控制策略研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(2): 53-57.
NIE Yang, GU Yujun, MENG Qinggong, et al. Research on LVRT control strategy for improving reactive power of DFIG[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(2): 53-57.
- [12] 崔杨, 严干贵, 孟磊, 等. 双馈感应风电机组异常脱网及其无功需求分析[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 158-163.
CUI Yang, YAN Gangui, MENG Lei, et al. Analysis on abnormal disconnection of doubly fed induction generator from power grid and its demand on reactive power[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 158-163.

- [13] 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.
- [14] 李鸿儒, 金炜东, 胡立锦, 等. 基于无功判定法的Crowbar保护电路退出控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 99-103.
LI Hongru, JIN Weidong, HU Lijin, et al. Crowbar protection circuit quitting control based on the reactive power judgment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 99-103.
- [15] PANNELL G, ATKINSON D J, ZAHAWI B. Minimum-threshold crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 750-759.
- [16] 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.
- [17] 张曼, 姜惠兰. 基于撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 271-278.
ZHANG Man, JIANG Huilan. Adaptive low voltage ride-through of doubly-fed induction generators based on crowbar with a parallel dynamic resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 271-278.
- [18] 徐玉琴, 曹璐璐. 双馈感应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.
XU Yuqin, CAO Lulu. Transient characteristics analysis of doubly fed induction generator and resistance optimization of crowbar circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 93-100.
- [19] ZOU Zhice, CHEN Xiaoyuan, LI Changsong, et al. Conceptual design and evaluation of a resistive-type SFCL for efficient fault ride through in a DFIG[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(1): 5600209.
- [20] 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. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-01-23

作者简介:

邹志策(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 助理工程师, 研究方向为双馈感应发电机低电压穿越; E-mail: zouzhucescu@163.com

雷一(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 高级工程师, 研究方向为风电技术及新能源电能变换技术; E-mail: leiyi@tsinghua-eiri.org

欧然(1992—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为风电技术及新能源电能变换技术。

(编辑 周金梅)