

DOI: 10.7667/PSPC170998

采用新型动态撬棒的DFIG低高电压连锁故障穿越技术研究

李生民¹, 贾铎², 肖亚敏²

(1. 陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对传统撬棒电路(采用固定电阻)在解决双馈风力发电机(DFIG)低高电压连锁故障穿越时, 难以兼顾发电机转子侧电流和直流母线电压的抑制问题, 采用电机电磁暂态分析的方法, 找出了双馈风力发电机转子电流、电压与撬棒电阻的关系, 提出一种撬棒电阻动态自适应的控制方法。该方法适用于低电压、高电压及低高电压连锁故障, 解决了电网故障穿越时无法同时抑制转子电流和母线电压的波动问题。采用理论分析和仿真实验, 证明该方法在电压跌落故障、电压骤升故障以及低高电压连锁故障下能够有效地抑制转子电流和直流母线电压的波动, 提高了系统的故障穿越能力。

关键词: 双馈风力发电; 低电压穿越; 高电压穿越; 低高电压连锁故障穿越; 新型动态撬棒

Low-high voltage chain fault ride-through technology of DFIG with active crowbar

LI Shengmin¹, JIA Duo², XIAO Yamin²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult for traditional crowbar circuit (fixed-value resistance) to balance the generator rotor side current and DC bus voltage while solving link fault ride-through of Double Fed Induction Generator (DFIG), the method of generator electromagnetic transient analysis is adopted to find out the relationship between rotor current, voltage and crowbar resistance of the DFIG, and the control method is suitable for low voltage, high voltage and low-high voltage chain fault, solving the problem that it's difficult to suppress the fluctuation between the rotor current and the bus voltage simultaneously during the grid fault ride-through. The theoretical analysis and simulation results validate that the method can effectively suppress the fluctuation of rotor current and DC bus voltage chain fault, and improve the system's fault ride-through capability.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607142).

Key words: doubly-fed induction generator; low voltage ride through; high voltage ride through; low-high voltage chain fault ride through; novel active crowbar circuit

0 引言

近年来, 随着风力发电系统的逐步大规模商用化以及其并网装机容量在电力系统中所占的比重不断增加, 出现了一些在电网故障条件下亟待解决的运行控制问题。目前现有研究主要集中在电网电压出现跌落故障时对双馈风力发电系统的电磁暂态过程分析^[1-5]和与之相应的低电压穿越技术^[6-13]。在实

际的电力系统中, 电网电压骤升故障以及低高电压连锁故障也时有发生。造成这些故障的主要原因在于: 1) 单相接地故障引起单相重合闸, 从而导致电网电压不对称骤升; 2) 大量负荷的突然切除也会引起电网电压的骤升故障; 3) 在低电压故障的恢复阶段, 若投入的补偿电容器不能及时地撤出, 就会导致电网电压的骤升, 形成低高电压连锁故障。

现有的实现电压穿越的方法主要分为以下两大类: 一类是通过改进并网运行控制策略来实现; 另一类是通过增加辅助的硬件电路来实现。由于单纯地依靠改变控制策略的方法在电网电压出现大幅

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607142); 陕西省重点产业创新链-工业领域项目资助(2017ZDCXL-GY-01-01)

电压跌落/骤升故障时的控制效果并不是很明显。文献[14]结合基于串联电阻Crowbar保护和改进网侧变流器控制策略的方式,实现了电网故障下DFIG的LVTR的优化控制。文献[15]建立了计及电压跌落的LVTR控制模型,通过仿真研究了Crowbar投切策略,验证了Crowbar电路以及控制策略的有效性。这些方法中撬棒电阻的阻值是是针对某一个故障等级的固定值,不能适用于所有故障等级。文献[16]针对DFIG在对称故障机端电压跌落中等幅值或不对称故障机端电压跌落较深等工况下,很难建立准确的撬棒保护模型来模拟DFIG机电暂态故障的问题,提出在Crowbar控制器机电暂态模型中引入转子负序电流补偿。文献[17]针对采用一个固定阻值Crowbar电路很难兼顾对转子电流和直流母线电压的抑制以及对Crowbar的投入持续时间的控制,提出基于Crowbar并联动态电阻 R_{PDR} 的双馈风力发电机低电压穿越方案及自适应控制策略,解决了Crowbar和并联电阻投切的自适应控制,但没有涉及高压故障穿越问题。故对高压穿越以及低高压连锁故障穿越技术的研究十分必要。

本文采取增加新型辅助撬棒电路的方法。现有的撬棒电路依据低电压穿越的标准来选取撬棒电阻。该撬棒阻值不一定在高电压故障中同样适用。为此本文从对投入撬棒电路后的双馈电机电磁暂态过程的分析入手,得到了撬棒阻值在低、高压故障穿越过程中选取的差异,从而提出由几种固定阻值的电阻组合出0~10 p.u.任意阻值的撬棒电阻电路,能够同时适用于低、高压故障。同时给出该电路的投切控制策略。最后,通过仿真验证所提出的撬棒电路及其控制策略的正确性及有效性。

1 传统撬棒电路及其存在的问题

1.1 撬棒电阻的选取对转子电流、电压的抑制上存在的矛盾

图1为双馈电机转子侧接入Crowbar电路的系

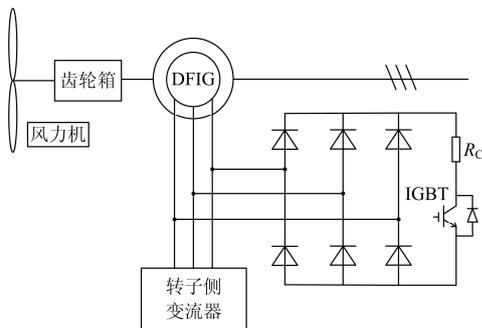


图1 传统主动式撬棒电路拓扑

Fig. 1 Topology of the traditional active crowbar

统结构图。当电网电压出现大幅的跌落或骤升故障时,一旦转子侧电流达到设定值,Crowbar电路就会投入,同时,转子侧变流器被封锁。

通过对双馈电机暂态模型以及故障暂态过程的分析可知,若当电网发生故障后将撬棒电路立即投入,那么流经Crowbar电路的电流以及撬棒电阻两端的电压峰值分别为^[18]

$$\begin{cases} I_r \approx \frac{\omega_r}{\omega_1} \times \frac{\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times E}{\sqrt{R_c^2 + (2\omega_r(L_r - L_m^2/L_s))^2}} \\ U_r \approx \frac{\omega_r}{\omega_1} \times \frac{\sqrt{3} \times \sqrt{2} \times E \times R_c}{\sqrt{R_c^2 + (2\omega_r(L_r - L_m^2/L_s))^2}} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)以及一些典型DFIG的运行参数,将故障最大化(这里取电压完全跌落的情况),则可得如图2所示的 R_c-I_r 、 R_c-U_r 的关系曲线。

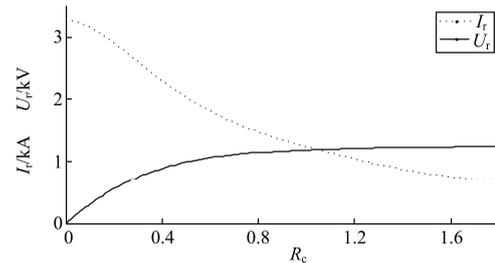


图2 转子电压电流与撬棒电阻阻值关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between rotor current, voltage and crowbar resistance

由图2可以看出 I_r 与 R_c 成反比,而 U_r 与 R_c 成正比。因此,撬棒电阻阻值选取的不应过小,否则无法达到很好的转子电流抑制效果,严重时甚至会导致转子侧过电流;同时,撬棒阻值也不应选取的过大,否则会造成转子电压升高,直流母线电压升高,从而导致直流母线电容的损坏。

由此可见,这种传统的撬棒电路存在着一定缺陷:若撬棒电阻的阻值一旦选定就不能更改,这就很难同时兼顾对直流母线电压 U_{dc} 的抑制和对转子侧电流的抑制。

1.2 撬棒阻值对低、高压故障暂态影响的差异

在忽略DFIG定、转子电阻,并将发电机转速在暂态过程中视为恒定的情况下,通过对DFIG磁链方程的变换得到电流与磁链的关系方程为

$$\begin{cases} i_s = \frac{1}{L_{ls} + \frac{L_r L_m}{L_r + L_m}} \varphi_s - \frac{L_m / L_r}{L_{ls} + \frac{L_r L_m}{L_r + L_m}} \varphi_r \\ i_r = \frac{1}{L_{lr} + \frac{L_s L_m}{L_s + L_m}} \varphi_r - \frac{L_m / L_s}{L_{lr} + \frac{L_s L_m}{L_s + L_m}} \varphi_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_s 、 L_r 为定转子绕组全自感; L_m 为定转子之间的互感; L_{ls} 、 L_{lr} 为定转子的漏感。

假定 DFIG 以功率因数 1 稳定运行, 在 $t_0 = 0$ 时, 电网发生三相对称电压故障, 经一系列推导及简化可以得到定子、转子暂态电流方程为

$$i_s = -i_r = \frac{U_s}{j\omega_s(L_r + L_{ls})} e^{-t/T_s} - \frac{1}{L_{ls} + L_{lr}} \varphi_{i0} e^{-t/T_r} e^{-j\omega_s t} \quad (3)$$

图 3 为将撬棒电路投入后双馈电机的等效电路。

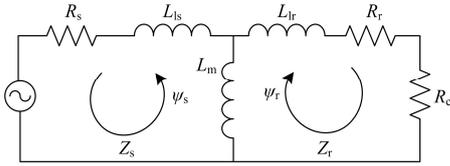


图 3 撬棒电路投入后的双馈电机等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the doubly-fed motor after crowbar circuit input

由于 $R_c \gg R_s$, $R_c \gg R_r$, 故可将定子侧与转子侧的等效阻抗写为

$$\begin{cases} Z_s(s) = \frac{-j\omega_s^2 L_m (L_{ls} + L_{lr}) + j\omega_s L_s R_c}{j\omega_s L_r + R_c} \\ Z_r(s) = j\omega_s (L_{ls} + L_{lr}) + R_c \end{cases} \quad (4)$$

在考虑不同的电压跌落骤升深度 P 的情况下, 将式(4)代入式(2), 进行一定的省略化简可以得到含撬棒电路的计及电压故障大小的定转子电流表达式为

$$i_s = -i_r = \frac{-PU_s}{j\omega_s(L_r + L_{ls}) + R_c} e^{-t/T_s} + \frac{1+P}{j\omega_s(L_r + L_{ls}) + R_c} U_s e^{-j\omega_s t} \quad (5)$$

式中: $T_s' = \frac{R_c^2 + \omega_s^2 L_s (L_{ls} + L_{lr})}{\omega_s^2 [L_s - (L_{ls} + L_{lr})] R_c}$; P 为正值表示电压

骤升故障, P 为负值表示电压跌落故障。

根据式(4)可以计算出转子电流峰值以及转子电压峰值与撬棒电阻 R_c 之间的关系式, 从而绘制出在不同电压故障下 DFIG 转子侧电流、电压峰值随撬棒电阻阻值变化的趋势如图 4 所示。

由图 4 可以看出撬棒电阻在两种故障情况下对转子电压及电流峰值的影响趋势是相同的。转子电压峰值随着撬棒电阻阻值的增大而增大, 转子电流峰值随着撬棒电阻阻值的增大而减小。但是从图 4 也可以明显看出, 电压跌落故障对转子电流电压的影响要大于电压骤升故障的影响。因此, 不同的电

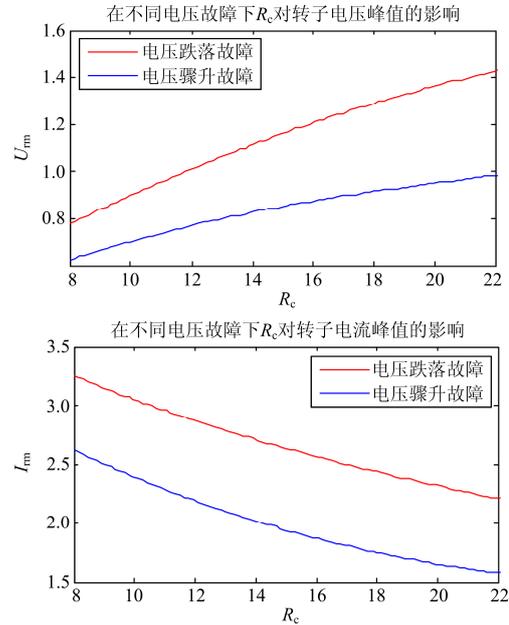


图 4 不同故障下转子电压电流与撬棒电阻阻值关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between rotor current, voltage and crowbar resistance under different fault conditions

压故障在对撬棒阻值的选取上是存在一定的差异的。若是撬棒电路选择一个固定的电阻就难以使得撬棒电路在电压骤升、跌落这两种故障状态下都取得最优的暂态分量抑制效果。

2 动态撬棒电路及其投切策略

2.1 动态撬棒电路拓扑及原理

由第 1 节的分析可知, 传统撬棒电路采用固定阻值的撬棒电阻存在以下两个问题: 1) 由于 I_r 与 R_c 成反比, 而 U_r 与 R_c 成正比, 采用固定阻值电阻难以兼顾对直流母线电压 U_{dc} 的抑制和对转子侧电流的抑制; 2) 电网发生不同电压故障(骤升/跌落)时对于撬棒电阻的阻值选取存在着一定的差异, 如按其中一种故障选取 R_c , 则另一种故障发生时, 撬棒电路无法很好地抑制暂态分量的效果。鉴于以上问题, 本节提出了一种新型的动态主动式撬棒电路, 实现撬棒阻值的自动调节, 其电路拓扑结构如图 5 所示。该动态撬棒电路的撬棒电阻由阻值分别为 1 p.u.、2 p.u.、2 p.u.、5 p.u. 的电阻串联而成, 它们的投切

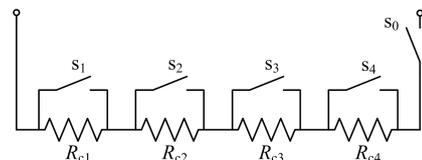


图 5 动态撬棒电路拓扑

Fig. 5 Topology of the active crowbar

由与其并联的全控型电力电子开关 IGBT(S1-S4)来控制, 整个撬棒电路的投切则由串联在线路中的 IGBT(S0)来控制。通过以上几种阻值的电阻可以组合出 0~10 p.u.任意阻值的撬棒电阻。

2.2 动态撬棒电阻的选择及投切策略

通过上述分析可知, 撬棒电阻阻值的选取对于撬棒电路能否很好地抑制因电网电压故障引起的暂态变化, 提高系统的电压穿越能力有着至关重要的作用。下面对撬棒电阻的选取进行说明。

由式(1)和式(5)可以得出确定撬棒电阻初值的方法, 首先, 为了抑制转子侧故障电流, 撬棒电阻的选取必须满足式(1)中关于转子电流的限制方程, 这样得到一个 R_{cmin} 。其次, 为了抑制直流母线电压, 必须满足式(1)中关于电压的限制条件, 计算得到 R_{cmax} 。最后通过选择适当的电流衰减时间常数按照式(5)计算电阻值, 同时要注意, 计算得出的电阻值在故障初期必须大于 R_{cmin} , 在故障后期必须小于 R_{cmax} 。式(6)即为关于 R_{cmin} 和 R_{cmax} 的计算公式。

$$\begin{cases} R_{cmin} = \frac{\sqrt{U_s^2 - \omega_s^2(L_{ls} + L_{lr})^2(1.2I_N)^2}}{1.2I_N} \\ R_{cmax} = \frac{U_{max}\omega_s(L_{ls} + L_{lr})}{\sqrt{3U_s^2 - U_{max}^2}} \end{cases} \quad (6)$$

通过计算并进行一定的近似取值可以得到撬棒电阻的取值范围约为 8~12 p.u., 同时为了满足后面针对不同故障和深度的要求, 在之前的电路中增加一个 5 p.u.的固定电阻, 使该动态撬棒电路的阻值范围在 5~15 p.u., 将之前的计算结果包含在内。在投切撬棒电阻时考虑到电压故障类型和故障程度不同阶段的主要控制目标等因素对实际投入电路中的撬棒电阻进行调整。

在电网电压出现骤升/跌落电压故障后, 转子侧电压会升高。当转子侧电压上升到与直流母线电压一样时便会向母线电容进行充电, 从而导致直流母线电压的升高。通常情况下, 转子侧的故障电流在经过 0.01 s(半个工频周期)后就会达到峰值, 而直流母线电压由于母线电容充电相对较慢还处在上升阶段。因此, 在故障发生开始阶段应该以抑制转子侧过电流为首要目标, 将转子侧电流划分为 5 个区间, 在不同区间内投入不同系数的撬棒电阻, 选取撬棒电阻阻值时应以式(1)中的电流方程为主, 计算值统一按四舍五入取整后投入, 通过粗略计算得到此时相对合适的撬棒电阻阻值, 控制 IGBT 投入相应的电阻组合。当直流母线电压上升到一定的阈值后, 撬棒电路的主要目标就转变为抑制直流母线电压的上升。此时, 转子电流已经得到了一定的抑制, 故

可以适当减小撬棒电阻阻值。具体投切流程如下:

- 1) 对电压故障进行检测, 如未发生故障则不打开撬棒电路总开关, 若发生电压故障则进入下一步。
- 2) 判断转子侧是否发生了过电流, 若发生了则根据本节前面给出的撬棒电阻计算方法确定撬棒电阻初值, 并根据故障程度乘以一定的系数。
- 3) 判断直流母线电压是否超过了阈值, 若超过了阈值, 则此时的主要控制目标转变为抑制直流母线电压过电流, 对之前选定的撬棒电阻值进行适当的减小。
- 4) 确定需要投入的撬棒阻值后, 查表获得相应的 IGBT 开关信息并输出。

图 6 为其投切控制流程图。

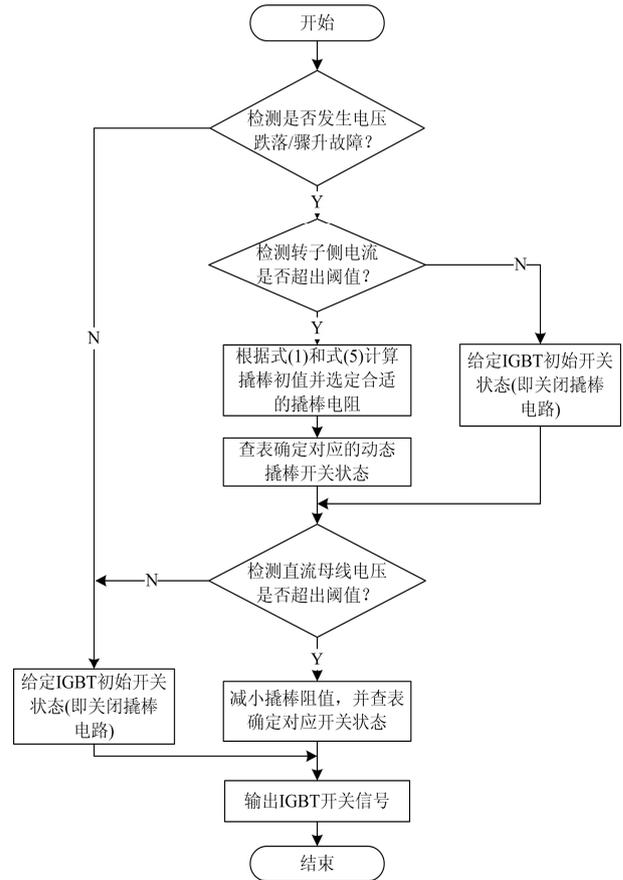


图 6 动态撬棒电路控制流程图

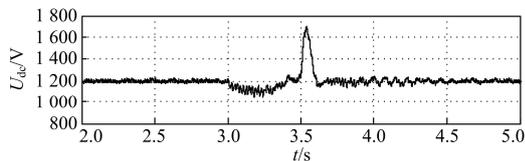
Fig. 6 Control flow chart of dynamic crowbar circuit

3 仿真分析

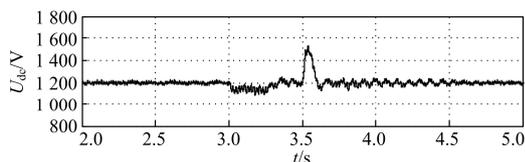
为了验证所提出的动态撬棒电路的正确性、有效性及对低压及高压故障的通用性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建了 2 MW 双馈风力发电系统模型、动态撬棒及其控制电路, 对其进行仿真验证。

3.1 电压跌落故障

设置在 0~3 s 内 DFIG 正常运行, 在 3 s 时并网点发生故障深度为 50% 的电压跌落故障, 故障持续 0.5 s 后消失。仿真结果如图 7—图 9, 分析如下。



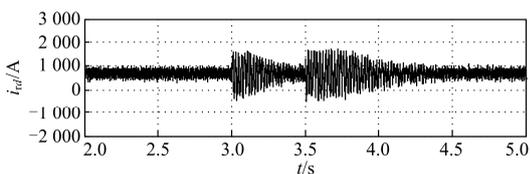
(a) 采用传统撬棒电路时 U_{dc} 波形



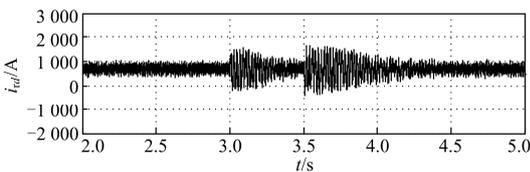
(b) 采用动态撬棒电路时 U_{dc} 波形

图 7 两种撬棒电路下直流母线电压波形

Fig. 7 DC bus voltage waveform under two kinds of crowbar circuits



(a) 采用传统撬棒电路时 i_{rd} 波形



(b) 采用动态撬棒电路时 i_{rd} 波形

图 8 电网电压跌落情况下采用两种撬棒电路下转子 d 轴电流波形

Fig. 8 Waveform of i_{rd} with two kinds of crowbar circuits under voltage dip

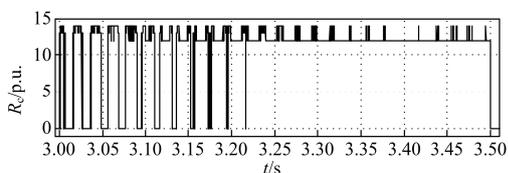


图 9 动态撬棒投入电阻阻值

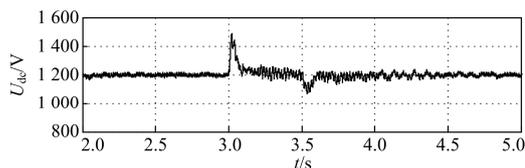
Fig. 9 Dynamic input crowbar resistance

由图 7 可以看出采用所提出的动态撬棒电路下的直流母线电压在故障时的峰值明显小于采用传统撬棒电路的。而由图 8 则可以看出对于转子侧过电

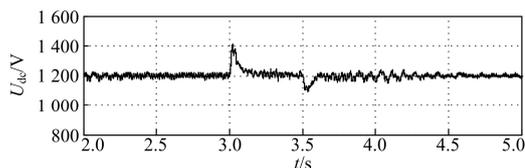
流的抑制方面, 从故障开始时刻到故障清除时即 3~3.5 s 时间段内, 采用动态撬棒电路的电流变化范围由传统撬棒电路的 -500~1 500 A 缩减至 -200~1 300 A 左右, 转子电流得到了较好的抑制。以上结果均说明了动态撬棒电路不仅能够达到抑制故障下的直流母线电压和转子侧过电流的效果, 而且其控制效果要优于传统撬棒电路。

3.2 电压骤升故障

在仿真进行到 3 s 时, 设置并网点发生持续时间为 0.5 s, 骤升幅度为 40% 的电压故障, 仿真波形如图 10 和图 11 所示。



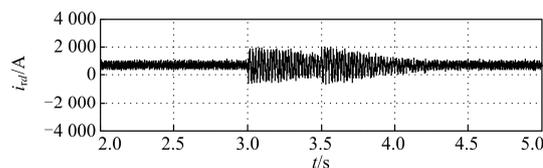
(a) 采用传统撬棒电路时 U_{dc} 波形



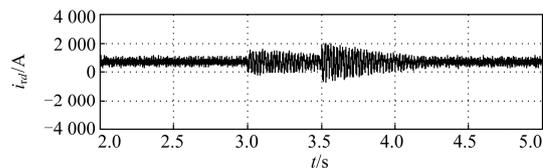
(b) 采用动态撬棒电路时 U_{dc} 波形

图 10 采用不同撬棒电路时直流母线电压波形

Fig. 10 DC bus voltage waveform under different crowbar circuits



(a) 采用传统撬棒电路时 i_{rd} 波形



(b) 采用动态撬棒电路时 i_{rd} 波形

图 11 采用不同撬棒电路时转子 d 轴电流波形

Fig. 11 i_{rd} waveform by different crowbar circuits

图 10 和图 11 为在电网发生高电压故障时, 采用传统撬棒电路和动态撬棒电路下的直流母线电压 U_{dc} 及转子侧 d 轴电流波形。从图 10 可以看出采用传统撬棒电路时, 直流母线电压冲击值约为 1 500 V; 而采用动态撬棒电路时, 直流母线电压冲

击值约为 1 400 V。同时,观察故障期间及故障清除后的一段时间内 U_{dc} 的波形,发现采用动态撬棒电路直流母线电压的波动要略小于采用传统撬棒电路。由图 11 可以看出,从故障开始时刻到故障清除时即 3~3.5 s 时间段内,采用动态撬棒电路下的转子电流变化范围由传统撬棒的 -400~2 000 A 缩减到了 -100~1 700 A 左右,转子电流得到了很好的抑制,效果要优于采用传统撬棒电路。但是在故障清除后,由于撬棒电路同时切出,故二者的 i_{rd} 波形基本一致。

3.3 低高压连锁故障

当电网发生低高压连锁故障时,由于之前电网电压先发生了电压跌落,随后在电压恢复阶段,电网电压又升到了较高的值,这相当于增大了电压骤升的幅度。为了对低高压连锁故障下动态撬棒电路的性能进行检测,下面对该故障过程进行仿真。仿真开始至 3 s 电网电压正常,3 s 时电网出现深度为 30% 的跌落故障,故障持续 0.5 s,在 3.5 s 时电网电压出现 30% 的骤升故障,故障持续 0.3 s,仿真得到的直流母线电压和转子侧电流如图 12 和图 13 所示。

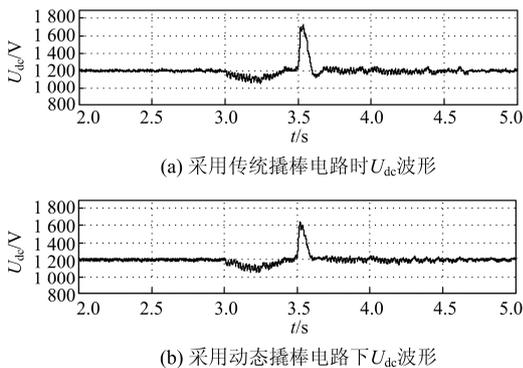


图 12 采用不同撬棒电路时直流母线电压波形
Fig. 12 DC bus voltage waveform under different crowbar circuits

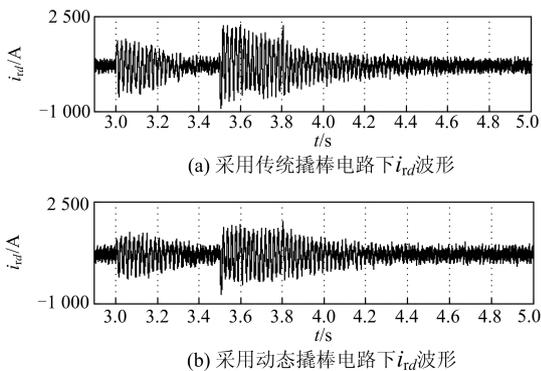


图 13 采用不同撬棒电路时转子 d 轴电流波形
Fig. 13 i_{rd} waveform by different crowbar circuits

从图 12 和图 13 可以看出,采用动态撬棒电路后直流母线电压峰值由原来的多于 1 700 V 下降到不到 1 600 V,有了较为明显的改善。同时,转子 d 轴电流变化范围由 -900~2 000 A 缩减为 -700 A~1 800 A 左右,比采用传统撬棒电路的转子 d 轴电流有了明显的下降,说明了动态撬棒电路的优越性。

4 总结

针对电网发生的较大程度的电压跌落/骤升故障时传统 Crowbar 电路不能兼顾对 DFIG 转子电流和直流母线电压的抑制,以及撬棒阻值的选择在高低电压故障中存在差异的问题,本文提出新型动态撬棒电阻的双馈风力发电机低高压穿越方案。通过对本文提出方法的分析和仿真实验验证,可得到如下结论:

- 1) 从对投入撬棒电路的双馈电机电磁暂态过程的分析入手,得出撬棒阻值在低高压故障穿越过程中选取的差异,从而给出了一种同时适用于低高压故障的动态撬棒电路电阻的整定方法。
- 2) 对低压故障,高压故障及低高压连锁故障时分别采用传统撬棒电路与采用本文所提的动态撬棒进行了仿真,结果验证了该方案同时兼顾两者的效果较好,不管是发生低压故障,高压故障还是低高压连锁故障其都能够同时有效地抑制转子电流和直流母线电压。

参考文献

[1] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 26-31.

BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault transient characteristics analysis of doubly-fed wind turbine generator with low voltage ride capacity[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.

[2] 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.

YU Lan, CHEN Yuchen, CHEN Guocheng, et al. A low voltage ride-through control strategy of doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 30-36.

[3] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. A series dynamic resistor based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions[J]

- IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 422-432.
- [4] 李菁, 杨浩, 段秦刚. 基于 Matlab 的双馈感应风力发电机组暂态模型[J]. 陕西电力, 2013, 41(8): 21-25.
LI Jing, YANG Hao, DUAN Qingang. Probe into model of doubly-fed induction wind turbine system based on Matlab[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(8): 21-25.
- [5] 杜晓岩, 尹华杰, 叶超, 等. 基于改进模糊 C 均值聚类类和 MPSO 的风电场等值研究[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 38-44.
DU Xiaoyan, YIN Huajie, YE Chao, et al. Wind farm equivalent research based on improved fuzzy C-means clustering and MPSO[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 38-44.
- [6] GAYEN P K, CHATTERJEE D, GOSWAMI S K. An improved low-voltage ride-through performance of DFIG based wind plant using stator dynamic composite fault current limiter[J]. ISA Transactions, 2016, 62(5): 333-348.
- [7] 张迪, 魏艳君, 杨宗丰, 等. 不平衡电网电压下基于滑模变结构控制的双馈风电系统转子侧变流器控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 31(10): 121-131.
ZHANG Di, WEI Yanjun, YANG Zongfeng, et al. The control strategy of rotor side converter of doubly fed wind power system based on sliding mode variable structure control under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 31(10): 121-131.
- [8] 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 double-fed wind generator with the stator Crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.
- [9] 赵鹏, 贾晶, 王瑞琪, 等. 一种无需考虑转子侧变流器耐压能力的双馈异步风电机组低电压穿越方法[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 17-22.
ZHAO Peng, JIA Jing, WANG Ruiqi, et al. Low voltage ride-through method for doubly-fed induction wind turbine without considering withstand voltage of rotor-side converter[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 17-22.
- [10] 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. Research on control strategy of DFIG in grid voltage asymmetry drop[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 71-78.
- [11] 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.
ZHANG Xueguang, XU Dianguo. Research on control of DFIG with active crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 99-103.
- [12] 蒋雪冬, 赵舫. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机 Crowbar 控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 84-89.
JIANG Xuedong, ZHAO Fang. Crowbar control strategy for doubly-fed induction generator of wind farm during power grid voltage dips[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 84-89.
- [13] 李琼, 刘春明, 张爱兰, 等. 风力发电系统低电压穿越技术研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(4): 30-32.
LI Cong, LIU Chunming, ZHANG Ailan, et al. Research on the low voltage ride through technology of wind power system[J]. Telecom Power Technology, 2016, 33(4): 30-32.
- [14] 栗然, 王倩, 卢云, 等. Crowbar 阻值对双馈感应发电机低电压穿越特性的影响[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 101-107.
LI Ran, WANG Qian, LU Yun, et al. Impact of Crowbar resistance on low voltage ride through of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 101-107.
- [15] 郑涛, 李娟, 杨国生. 计及不同电网电压跌落程度的双馈风电机组定子电流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 81-87.
ZHENG Tao, LI Juan, YANG Guosheng. Stator current analysis of doubly-fed induction generators considering different grid voltage dip levels[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 81-87.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
-
- 收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-12-01
- 作者简介:
李生民(1962—), 男, 副教授, 研究方向为矩阵式交-交变换器电能变换与现代电力传动, 工业综合自动化系统; E-mail: lsm707@xaut.edu.cn
贾 铎(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动及新能源并网控制; E-mail: 362249163@qq.com
肖亚敏(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动及新能源并网控制。E-mail: 1071519440@qq.com
- (编辑 周金梅)