

基于DIgSILENT的双馈风机低电压穿越特性分析

叶燕飞,王琦,姜楠,濮昌期

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏南京 210042)

[摘要] 多次发生的大规模风电机组相继脱网事故严重影响集群风电并网消纳和电网安全。当电力系统电压出现跌落时,大容量风电场的切出会影响系统运行的稳定性,这就要求风电机组具备低电压穿越能力,以保证系统出现电压跌落时风电机组不间断并网运行。为研究风电机组与系统的交互影响,探讨了双馈风电机组撬棒保护电阻取值、投切控制策略,并分析了低电压情况下双馈风电机组DFIG的保护控制措施与系统动态特性之间的联系。在DIgSILENT中搭建双馈风电场分析撬棒阻值不同对风机实现低电压穿越的影响,并研究了不同故障情况下双馈风机低电压穿越特性。本文的研究结果可以为风电机组的并网运行和电网的稳定运行提供参考。

[关键词] 低电压穿越,双馈风电机组,撬棒,DIgSILENT

[中图分类号] TM614 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)01-0009-07

Analysis of LVRT Characteristics of DFIG Based on DIgSILENT

Ye Yanfei, Wang Qi, Jiang Nan, Pu Changqi

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Large scale wind turbines tripping accidents have occurred repeatedly, which seriously affect the wind power consumption and power grid security. When the grid voltage drops, the resection of large wind farm will affect the stability of the grid, so it requires the wind generators to have LVRT ability to ensure themselves to keep parallel operating continuously when voltage drops. To study the impacts of wind turbines integrated with grid, the resistance value and switching strategy of crowbar are discussed. And the relation between the protection of DFIG during low voltage fault and the dynamic characteristic of grid is established from the points of generator operation constrains and district grid voltage stability. Doubly fed wind farm is built to validate the effectiveness of crowbar protection by using DIgSILENT. Besides, the low voltage ride through characteristics of doubly fed wind turbine are studied under different fault conditions. The research results can provide references for the grid operation and the stable operation of the wind turbine.

Key words: low voltage ride through (LVRT), doubly fed induction generator (DFIG), crowbar, DIgSILENT

随着大规模风电的并网运行,电网电压跌落期间,风电场控制及其对电网安全稳定的影响已成为风电发展的重要课题之一。双馈风力发电机具有变频器容量较小、有功和无功可独立解耦控制的特点,目前已成为主流风电机型之一。越来越多的电网运营商在其风电并网运行导则中,明确要求双馈风电机组必须具备低电压穿越(LVRT)能力。

低电压穿越是指当电网发生故障导致电压跌落时,要求风力发电机组必须能并网运行一段时间,并在故障解除后,迅速恢复到正常工作状态,以免引发更大的扰动和更严重的系统故障。关于双馈风机低电压穿越研究,国内外学者已取得了一些成果,主要提出以下一些实现低电压穿越的方法:包括在转子侧增加撬棒(Crowbar)保护电路、动态电阻、改进DFIG的控制策略和无功补偿策略等^[1-6]。利用Crowbar电路实现风电机组的低电压穿越有一定的可行性,但当Crowbar电路投入后,变换器触发脉冲被封锁,控制系统

收稿日期:2015-08-24.

通讯联系人:王琦,博士,副教授,研究方向:可再生能源发电技术、电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统的网络安全研究。

E-mail: wangqi@njnu.edu.cn

失去了对 DFIG 的功率控制,DFIG 变为具有串联电阻的普通绕线式异步电动机,此时需要向电网吸收大量无功,有可能导致电网故障进一步恶化.因此,需要对 Crowbar 电路进行深入研究,分析 Crowbar 电阻的取值范围和 Crowbar 电路在不同类型电网故障情况下的低电压穿越性能,为风电机组的并网运行和电网的稳定运行提供参考.

本文采用转子侧附加 Crowbar 电路实现双馈风机的低电压穿越.首先确定 Crowbar 电路的阻值选取范围,介绍 Crowbar 电路的投切策略,然后在 DIgSILENT 软件中搭建双馈风电场模型和 Crowbar 保护模块,研究 Crowbar 电阻取值大小对双馈风机低电压穿越性能的影响,并通过不同故障类型下的暂态仿真,分析双馈风机低电压穿越特性.

1 Crowbar 电路电阻值的确定

本文采用的 Crowbar 保护电路如图 1 所示.当转子绕组电流值大于系统设置的给定值时,触发绝缘栅双极型晶体管 IGBT 导通,封锁变换器触发脉冲,Crowbar 电路投入运行;当暂态分量衰减完毕后,触发 IGBT 关断,恢复变换器触发脉冲.在电压跌落和恢复过程中, R_{crow} 越大,转子绕组电流值越能得到有效抑制,转子电流幅值越小^[7-8].此时,转子功率因数随 R_{crow} 的增加而变好,故障分量会通过等效转子阻抗被快速消耗,DFIG 从电网吸收的无功功率将减小,从而有利于电网电压的恢复.

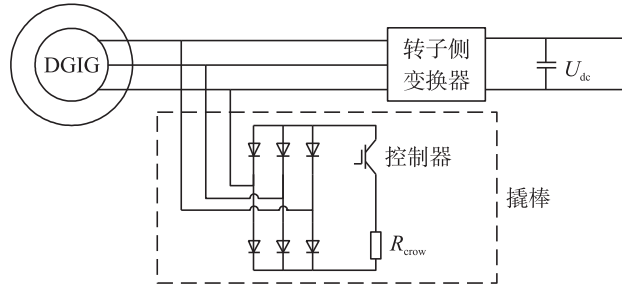


图1 Crowbar 保护主电路图

Fig.1 The main circuit diagram of Crowbar protection

当转子回路中故障电流一定时,随着 R_{crow} 的增大,其两端电位差随之增大,过大的电压会在 Crowbar 电路投入时,通过与 IGBT 反并联的二极管对 PWM 变频器中的直流母线电容进行反充电^[9],从而影响母线电容安全运行.因此 R_{crow} 阻值的选择至关重要.

在 DFIG 稳态运行时,由于定子直接与电网相连,忽略定子电阻,则定子磁链幅值保持不变,且恒定超前电网电压矢量 90° ,可表示为

$$\begin{cases} \psi_s = -\frac{U_s}{j\omega_s} = -\frac{U_s e^{j\omega_s t}}{j\omega_s}, \\ \psi_r = -\frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{U_s e^{j(\omega_s t - \theta)}}{j\omega_s}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, ψ_s 、 ψ_r 分别为定转子磁链; U_s 为定子电压; ω_s 为定子角速度; L_r 、 L_m 分别为转子电感和互感; θ 为转子角.

假设 $t=0$ 时刻电网电压发生跌落,则定、转子磁链故障初始值为:

$$\begin{cases} \psi_{s0} = -\frac{U_{s0}}{j\omega_s}, \\ \psi_{r0} = -\frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{U_{s0} e^{j(\omega_s t - \theta)}}{j\omega_s}, \end{cases} \quad (2)$$

式中, ψ_{s0} 、 ψ_{r0} 分别为定转子磁链故障初始值; U_{s0} 为磁链故障时刻定子电压初始值.

则电压跌落,定、转子磁链为:

$$\begin{cases} \psi_s = -\frac{U_{s0}}{j\omega_s} e^{-j\omega_s t}, \\ \psi_r = -\frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{U_{s0} e^{j(\omega_s t - \theta)} e^{-j\omega_s t}}{j\omega_s}. \end{cases} \quad (3)$$

由上式可得电压跌落后转子电流近似为:

$$i_r = \frac{U_{s0}}{-j\omega_s L_s + R_{crow}} \left(e^{-j\omega_s t} - \frac{L_r}{L_m} e^{-j(\omega_s t - \theta)} e^{-j\omega_s t} \right). \quad (4)$$

因此转子电流的最大值为:

$$I_{\max} = U_s / \sqrt{(\omega_s L_s)^2 + R_{crow}^2}. \quad (5)$$

为保证 Crowbar 电路保护的有效性,要求故障电流的最大值小于设定的安全电流 I_{safe} ,即:

$R_{crow} = \sqrt{(U_s / I_{\text{safe}})^2 - (\omega_s L_s)^2}$,但随着 R_{crow} 的增大,会造成直流母线电压过高.因此, R_{crow} 所产生的直流母线过电压必须被控制在母线电容所能承受的范围之内,即:

$$U_{\text{dcmax}} = \frac{\sqrt{3} U_s R_{crow}}{\sqrt{(\omega_s L_s)^2 + R_{crow}^2}} < U_{\text{dcsafe}}. \quad (6)$$

由上式可得:

$$R_{crow} < \frac{\omega_s L_s U_{\text{dcsafe}}}{\sqrt{3U_s^2 - U_{\text{dcsafe}}^2}}. \quad (7)$$

2 Crowbar 电路控制策略

2.1 Crowbar 投切策略

当电网发生故障时,触发有源 Crowbar 电路中的 IGBT 导通,使双馈感应发电机的转子短路,以保护转子侧变频器;恢复正常工况后 IGBT 截止,转子侧变频器再次投入工作.目前大多数风力发电机组制造厂商都采取这种方法.

故障期间,若机组暂态过程基本结束,能够及时恢复变频器的控制,不仅能够及时平衡有功,且将有力支撑电网电压,提高系统的稳定性.若变频器恢复控制的时间与电网电压恢复的时间重叠或滞后于电网电压恢复时间,将可能加剧电网的暂态过程,对变频器恢复控制的机组存在二次投入 Crowbar 保护的风险.

为有效避免与电网电压恢复时间和自动重合闸时间重叠,变频器恢复运行的时间整定为故障清除后的 1~2 周波^[10].

2.2 无功控制策略

电网故障瞬间,由于电网电压跌落导致 DFIG 的定子端电压降低,其有功功率的输出也随之下降,由于变频器的容量是固定的,若用转子 q 轴电流来保持有功功率不变,就需要减小无功功率的输出.同时,为了不使故障加剧,根据我国电网导则对动态无功功率的要求,需要在电网电压跌落期间增大无功功率出力,减少有功功率出力^[11].正常运行时,双馈风电机组以恒功率运行,即只有有功输出,没有无功输出.考虑到转子侧变频器的容量以及在跌落期间对动态无功的需求,本文采用新的控制策略,在电网电压跌落到小于额定值的 90% 时,减少机组的有功出力;在电压落到额定电压的 90%~50% 时,有功从 1 减小到 0.6;跌落到 50%~30% 时,有功功率由 0.6 减小到 0;跌落到 30% 以下,有功功率保持为零.机组在电压跌落到额定电压的 90%~50% 时,无功功率从 0 增加到 1;电压跌落到额定电压 50%~0 时,无功功率保持为 1.

3 案例分析

3.1 算例系统建模

本文采用 DIgSILENT 软件搭建双馈风电场模型和 Crowbar 保护模块.算例系统如图 2 所示,包含两

个 100 MW 火电厂、一个 100 MW 水电厂、一个双馈风电场和两个恒功率负荷。其中,风电场选用 4.5 MW 双馈风机,总容量为 90 MW。风机机端电压为 0.69 kV,先经箱式变压器升至 30 kV,再由联络线接入汇集母线,升压至 110 kV 后接入电网。仿真式风机采用恒功率控制模式。

双馈风机控制模块主要由转子侧变频器控制、网侧变频器控制和风力机控制组成。图 3 为转子侧变频器和风力机控制部分,图中虚线框框出为 Crowbar 保护模块。图 4 为双馈风机网侧变频器控制部分,其中,Crowbar 保护模块封装如图 5 所示。

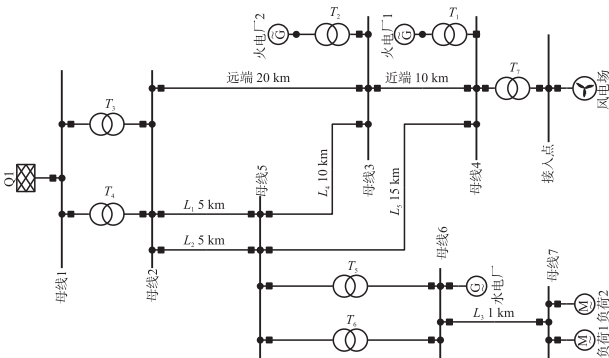


图 2 算例系统

Fig.2 Case system

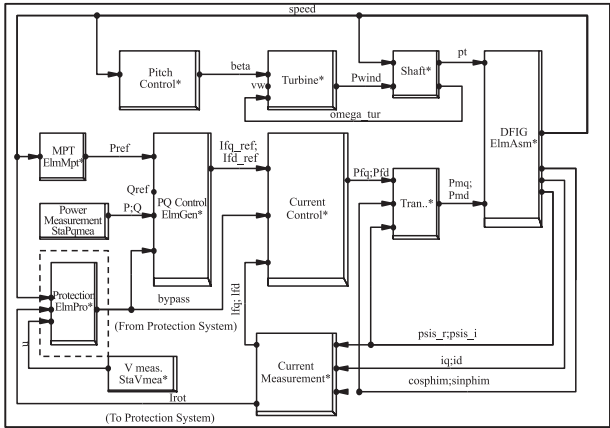


图 3 转子侧变频器控制和风力机控制模块

Fig.3 Control and the control module of the modulerotor side converter

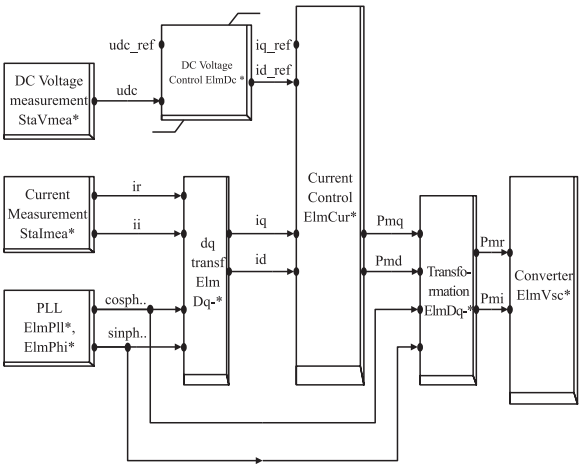


图 4 网侧变频器控制模块

Fig.4 Network side converter control

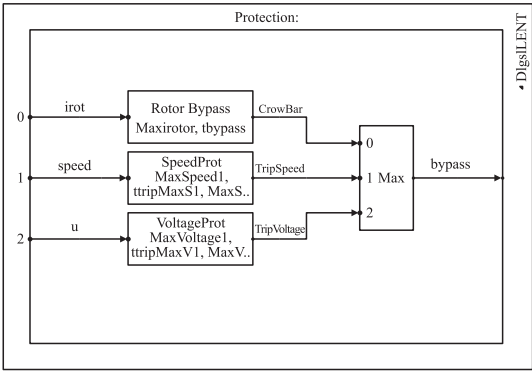


图 5 Crowbar 保护模块封装

Fig.5 Crowbar protection module package

3.2 故障下 LVRT 特性分析

假设 1 s 时刻风电场低压母线发生三相短路,故障持续时间 500 ms,Crowbar 投入时间 500 ms,Crowbar 电阻设置为 0.05 p.u.. 两种情况下,故障发生瞬间电压都骤降,转子电流激增,突变的转子电流使得功率输出冲击震荡,严重影响风机的并网运行。故障清除时刻,产生一个新的暂态过程,也引起转子电流激变。从图 6 可以看出 Crowbar 电路的投入可有效减小故障时刻的冲击电流,机端电压降落也得到改善,无论是电网故障时刻还是故障清除时刻,对风机的冲击都得到缓解,暂态过程结束更快,因此,Crowbar 电路的投入能够有效改善双馈风机的低电压穿越性能。

为分析不同的 Crowbar 阻值对双馈风机实现低电压穿越性能的影响,分别取 Crowbar 阻值为 0.01 p.u.、0.05 p.u. 和 0.1 p.u.,故障设置与上相同。从图 7 可以看出,Crowbar 阻值大时,故障时刻风机机端电压降落较少,转子电流冲击也较小,有利于风机实现低电压穿越,保证在电压跌落期间仍能并网运行,一般取 0.05 p.u. 到 0.1 p.u. 之间为最佳。

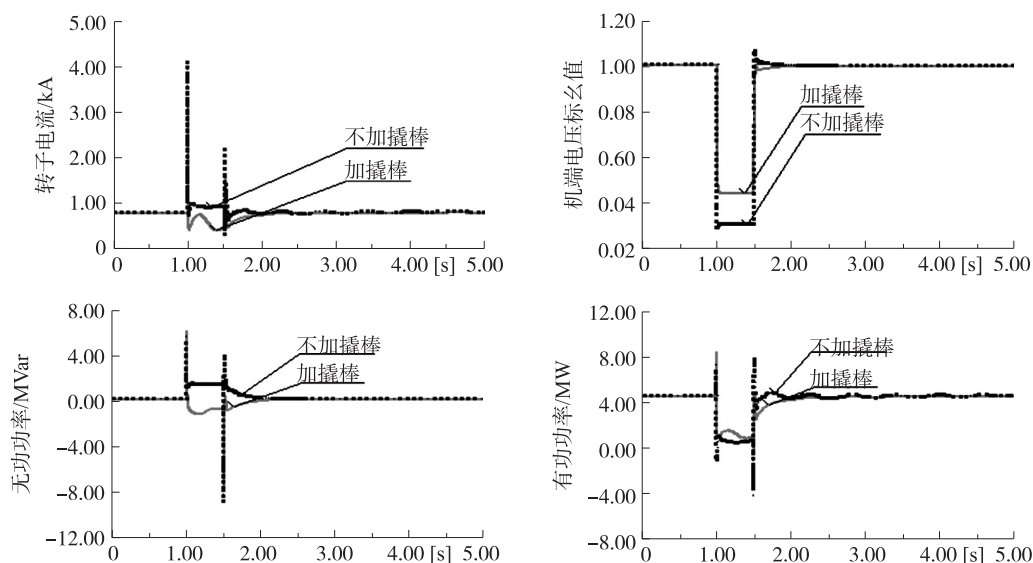


图6 加撬棒前后LVRT特性对比

Fig.6 Comparison of LVRT properties before and after crowbar

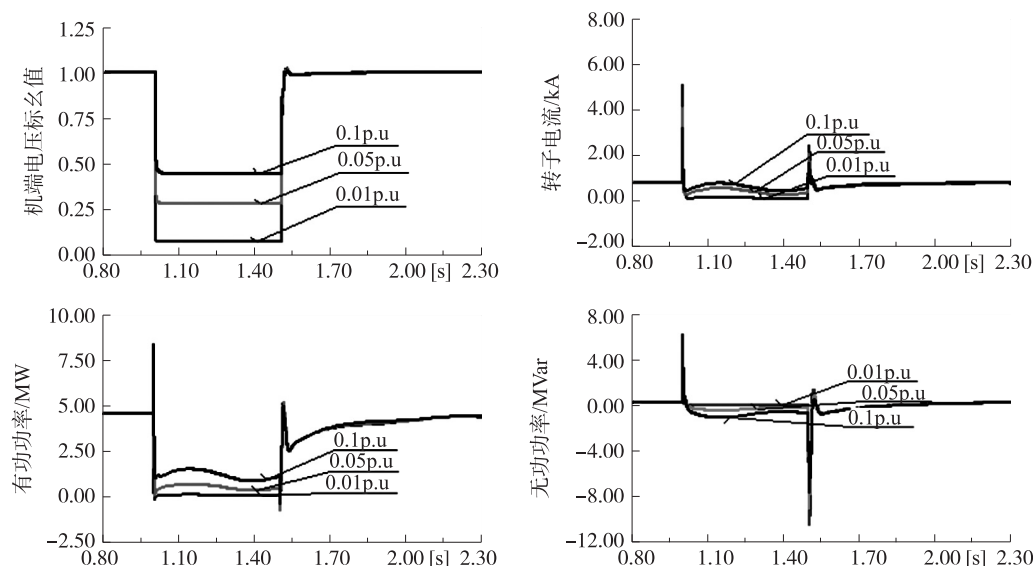


图7 机端短路时LVRT特性

Fig.7 LVRT characteristics of short circuit

为分析故障的位置对双馈风机实现低电压穿越性能的影响,假设三相短路发生在3个不同的位置:1)风电场机端母线;2)风电场近端线路;3)风电场远端线路.1 s时刻发生故障,持续时间为500 s, Crowbar 电路在故障发生后瞬间投入, Crowbar 阻值为 0.05 p.u.. 从图 8 可以看出,当短路发生在电网侧时,短路点距离风电场位置越远,短路对风电场的影响越小,机端电压降落越少,越容易实现低电压穿越.当故障发生在机端母线时,虽然故障点离风机位置最近,但由于电网侧仍正常,转子侧的直流母线电压也正常,功率仍可从直流侧进行交换,因此故障对风机的影响并没有近端线路发生故障时大.

为分析故障时电压降落严重程度对双馈风机实现低电压穿越性能的影响,假设 1s 时刻风电场接入点发生三相短路,故障持续时间为 500 ms,故障后瞬间投入 Crowbar 电路, Crowbar 电阻选为 0.05 p.u.. 从图 9 可以看出,当故障引起电网电压降落时,风机机端电压也基本跟随电网电压降落.当电网电压下降到 0.9 p.u. 时, Crowbar 保护不会被触发,风机能顺利度过低电压时期,故障发生和清除时刻转子电流的波动不大,在风机的额定值附近,对风机的功率输出影响也不大.当电网电压降落到 0.3 p.u. 时,双馈风机机端下降至 0.2 p.u. 左右,可见电网电压降落过多对风机的影响极大,此时由于 Crowbar

电路的投入,风机仍能并网运行.在故障清除时刻,转子电流的波动较大,对电网的冲击也较大,需要从电网吸收大量无功,可能导致电网电压新的降落,并再一次触发 Crowbar 电路.

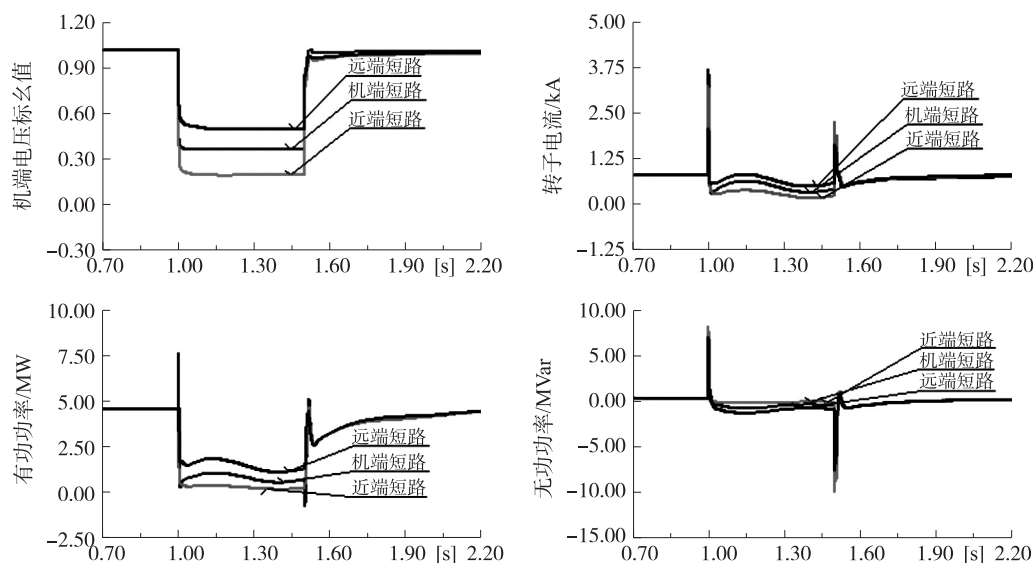


图8 故障位置不同时LVRT特性

Fig.8 LVRT characteristics of different fault position

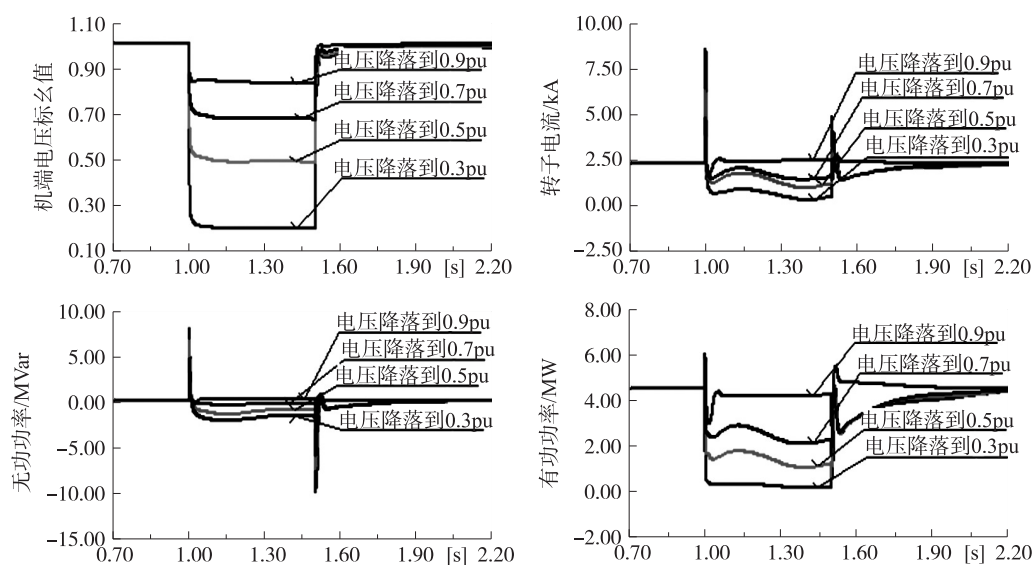


图9 电压降落对LVRT特性的影响

Fig.9 Effect of voltage drop on LVRT characteristics

4 结语

本文针对双馈风电场的低电压穿越进行研究,首先分析了现有的双馈风机低电压穿越实现方案,然后采用 Crowbar 电路对双馈风机进行保护,分析了 Crowbar 电阻的取值范围和 Crowbar 电路的投切策略.需要把握 Crowbar 电路投切的时机,切出时间过早或过晚,都可能导致第二次 Crowbar 电路的触发,不利于电网的恢复.从仿真结果可以看出,Crowbar 电路的投入对风机实现低电压穿越有很好的作用.Crowbar 电阻的取值是 Crowbar 电路的关键,Crowbar 电阻过小,不利于电网电压的恢复;但 Crowbar 电阻并非越大越好,若取值过大,可能导致双馈风机直流侧母线电压升高,同样影响风机的安全运行.当撬棒取值一定时,故障点离风电场越远,对风电场的影响越小,风机越容易实现低电压穿越.

[参考文献](References)

- [1] 杨国生,李欣,周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术,2009(11):87-91,103.
YANG G S, LI X, ZHOU Z X. The influence and countermeasures of wind farm access on the relay protection of power distribution network[J]. Network technology, 2009(11):87-91,103.(in Chinese)
- [2] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·依布拉音. 风电场对电网继电保护的影响[J]. 电网技术,2008(14):15-18.
WEN Y L, CHAO Q, YURSUN -YBRA. Effect of wind farm on power system protection[J]. Network technology, 2008(14):15-18.(in Chinese)
- [3] 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(2):97-102.
CHE Q, LU Y P. The crowbar low voltage ride through (LVRT) of wind farm protection fixed value setting[J]. Power system protection and control, 2013(2):97-102.(in Chinese)
- [4] 黄涛,陆于平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J]. 电网技术,2014(10):2 759-2 765.
HUANG T, LU YU P. Crowbar power grid technology[J]. Power system technology, 2014, 10:2 759-2 765.(in Chinese)
- [5] 苏常胜,李凤婷,武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化,2011(6):86-91.
SU C S, LI F T, WU Y P. Double-fed wind turbine characteristic and its impact on protection setting of short-circuit[J]. Automation of electric power systems, 2011(6):86-91.(in Chinese)
- [6] 杜强,张惠娟,张同庆. 双馈风力发电机组 Crowbar 电路保护技术的研究[J]. 电力电子技术,2011(8):48-50,92.
DU Q, ZHANG H J, ZHANG T Q. Research on the protection technology of the Crowbar circuit of the doubly fed wind turbine[J]. Power electronics technology, 2011(8):48-50,92.(in Chinese)
- [7] 杨淑英,陈刘伟,孙灯悦,等. 非对称电网故障下的双馈风电机组低电压穿越暂态控制策略[J]. 电力系统自动化,2014(18):13-19.
YANG S Y, CHEN L W, SUN D Y, et al. Under non symmetrical grid fault of double fed wind turbine low voltage through transient control strategy[J]. Automation of electric power systems, 2014(18):13-19.(in Chinese)
- [8] 马浩森,高勇,杨媛,等. 双馈风力发电低电压穿越撬棒阻值模糊优化[J]. 中国电机工程学报,2012(34):17-23.
MA H M, GAO Y, YANG Y, et al. Doubly fed wind power low voltage across the crowbar resistance fuzzy optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2012(34):17-23.(in Chinese)
- [9] 向昌明,范立新,蒋一泉,等. 风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究[J]. 电力自动化设备,2013(12):91-97.
XIANG C M, FAN L X, JIANG Y Q, et al. Wind turbines chain off network mechanism and low voltage crossing ability[J]. Electric power automation equipment, 2013(12):91-97.(in Chinese)
- [10] 徐殿国,王伟,陈宁. 基于 Crowbar 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(22):29-36.
XU D G, WANG W, CHEN N. Analysis of the low voltage ride through dynamic characteristics of the wind farm based on Crowbar protection of the double fed motor[J]. Chinese journal of electrical engineering, 2010(22):29-36.(in Chinese)
- [11] 姚兴佳,董鹤楠,刘颖明,等. 基于撬棒保护的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略研究[J]. 可再生能源,2013(2):52-57.
YAO X J, DONG H N, LIU Y M, et al. Based on the low voltage ride through control strategy[J]. Renewable energy of crowbar protection doubly fed wind turbine, 2013(2):52-57.(in Chinese)

[责任编辑:严海琳]