第33卷 第4期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 4

2020年12月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Dec. 2020

Crowbar 保护对风电场 LVRT 的影响分析与仿真

杨伟伟¹, 王硕禾¹, 陈 金²

(1. 石家庄铁道大学 电气与电子工程学院,河北 石家庄 050043;2. 河北鲲能电力工程咨询有限公司,河北 石家庄 050000)

摘要:现阶段风机低电压穿越(LVRT)的主要手段为撬棒(Crowbar)保护与变流器的投切 配合,且具备了 LVRT 能力的双馈感应发电机(DFIG)的故障暂态特性发生了改变,其中 Crowbar 保护的影响尤为重要。针对上述情况,首先研究 Crowbar 保护投入与否对风机短路暂态特 性的影响,其次分别对 Crowbar 保护投入与变流器工作时的风电场故障情况进行仿真分析,并 进一步仿真分析 Crowbar 阻值和投切时间对风电场短路电流的影响。算例仿真分析表明 Crowbar 阻值及其投切时间都会影响风电场短路电流。该研究对风电场保护整定设计具有重 要意义。

关键词:DFIG;Crowbar 保护;短路电流;LVRT;PSCAD/EMTDC;风电场 中图分类号:TM72 文献标志码:A 文章编号: 2095-0373(2020)04-0057-06

0 引言

随着风电场的大规模并网,风电场普遍具备了 LVRT 能力^[1]。近年来,由于 DFIG 具备有功和无功 功率独立控制、调速范围广及励磁变流器容量小等特点,被风电场作为首选兆瓦级机型。目前,DFIG 的 LVRT 策略主要是:增加变流器容量、改进变流器控制策略或者增加硬件励磁涌流消纳电路等^[2-3],增加 硬件电路多以在转子侧变流器侧安装 Crowbar 实现。当机端发生电压大幅度跌落时,转子侧投入 Crowbar 使转子侧变流器闭锁^[4-6],同时防止直流母线过电压和转子过电流对转子侧变流器造成损坏。切除 Crowbar 之前 DFIG 相当于异步发电机,不同于变流器工作时的短路电流特性。文献[7]分析了风电场大 规模连锁脱网原因,并进一步讨论了 DFIG 转子侧变流器加装 Crowbar 保护电路的必要性,但没有从风 电场的角度分析 Crowbar 保护对其自身的影响。

由于电力电子器件的快速发展,其在 DFIG 中的广泛应用使得 DFIG 短路暂态特性相当复杂,目前 Crowbar 保护投切开关主要由电力电子器件控制,从而加快故障电流衰减并分担一部分短路电流。对于 Crowbar 阻值对短路电流的影响已经取得了一定的成果。文献[8]~文献[12]从 DFIG 的数学模型出发, 根据 Crowbar 投入后的短路特性推导了转子电流的暂态表达式。文献[13]、文献[14]给出了 Crowbar 阻 值优化方案。文献[15]通过 Matlab/Simulink 搭建含 Crowbar 的风电场并网模型,仿真表明 Crowbar 阻 储优化方案。文献[15]通过 Matlab/Simulink 搭建含 Crowbar 的风电场并网模型,仿真表明 Crowbar 能 够提高风电场抵御电压跌落的性能。文献[15]提出自适应的 Crowbar 阻值调整策略,该方法能满足不同 情况下的转子电流和直流电压。以上研究均从 Crowbar 阻值入手进行研究,但对 Crowbar 投切时间方面 的深入研究较少,综合研究 Crowbar 阻值与投切时间的相互影响以及其对 LVRT 影响的文献较少。

基于以上情况,结合 DFIG 并网结构,分析 Crowbar 保护的工作原理,并从 DFIG 数学模型出发分析 投入 Crowbar 保护后的特性变化机理。在此基础上,以实际风电场为依托搭建仿真模型,研究不同 Crowbar 阻值和投切时间以及 Crowbar 保护投入与否对风电场短路电流的影响,进而分析 Crowbar 保护 对 LVRT 效果的影响。

收稿日期:2019-07-25 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j. cnki. sjztddxxbzrb.20190123 基金项目:河北省分布式能源应用技术创新中心资助项目(SG20182050) 作者简介:杨伟伟(1995—),男,硕士研究生,研究方向为可再生能源发电。E-mail:1213892834@qq.com 杨伟伟,王硕禾,陈金. Crowbar 保护对风电场 LVRT 的影响分析与仿真[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):57-62.

1 DFIG 并网结构及 Crowbar 保护工作原理

图1所示为 Crowbar 保护的 DFIG 并网结构图, DFIG 定子侧直接通过升压变压器连接到电网,转子 侧则通过可以四象限工作的转子侧变流器连接到电 网。为了避免机端电压跌落时造成的转子侧变流过 电流或者直流链路过电压,在转子侧变流器处安装 Crowbar 保护电路,如图1 虚线框内所示。其结构一 般由可控二极管组成的开关部分和晶闸管串联电阻 部分构成。



图 1 Crowbar 保护的 DFIG 并网结构图

图 2 所示为 Crowbar 保护动作逻辑图, Crowbar

保护电路工作原理为:触发转子过电流门限或者触发直流母线过电压门限,则 Crowbar 保护动作。图 3 所示为基于 PSCAD/EMTDC 软件采用 IEEE14 节点风电场模型在 1.2 s 时发生故障的 Crowbar 动作情况。当电网发生严重故障时,Crowbar 保护约 1.027 5 s 延时后投入。



图 2 Crowbar 保护动作逻辑图

2 DFIG 数学模型及含 Crowbar 的 DFIG 特 性变化

采用空间矢量法,归算所有参数至定子侧,则 DFIG 的 电磁暂态方程为^[16-17]

$$\boldsymbol{u}_{s} = \boldsymbol{R}_{s} \boldsymbol{i}_{s} + \mathbf{j} \boldsymbol{\omega}_{s} \boldsymbol{\psi}_{s} + \frac{\mathrm{d} \boldsymbol{\psi}_{s}}{\mathrm{d} t}$$
(1)

$$\boldsymbol{u}_{r} = \boldsymbol{R}_{r} \boldsymbol{i}_{r} + \mathbf{j}_{\boldsymbol{\omega}_{s-r}} \boldsymbol{\psi}_{r} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{r}}{\mathrm{d}t}$$
(2)

$$\psi_s = L_s \boldsymbol{i}_s + L_m \boldsymbol{i}_r$$

$$\psi_r = L_r \boldsymbol{i}_r + L_m \boldsymbol{i}_s$$

(3)



$$L_{s} = L_{s} + L_{m}$$
(5)
$$L_{r} = L_{m} + L_{m}$$
(6)

式中, u_s 、 u_r 、 i_s 、 i_r 、 R_s 、 R_r 、 ϕ_s 、 ϕ_r 分别为定、转子电压、电流、电阻和磁链; ω_s 、 ω_{s-r} 分别为同步角速度和转差角速度;下标 s 和 r 分别代表定子绕组和转子绕组,字母斜体加粗表示变量为空间矢量; L_m 、 L_m 、 L_m 分别为

激磁电感、定子漏感和转子漏感。

含 Crowbar 电阻的定子侧等效阻抗如图 4 所示, 利用戴维南定理可推导出定子侧阻抗表达式为

 $Z_s = j\omega_s L_s + [(R_{CB} + j\omega_s L_n)/j\omega L_m] = R_{CB} + j\omega_s L_s'$ (7) 式中, R_{CB} 为 Crowbar 电阻。分析式(7)可知定子侧阻 抗变大,将会使风机短路电流减少。

Crowbar 保护启动后,转子侧电阻值将发生改变, 同时定转子时间常数也相应发生变化,表达式为





图 4 含 Crowbar 电阻后的 DFIG 暂态等值电路

$$= \frac{R_s}{R_s}$$

$$= \frac{L_r'}{R_r + R_{CB}}$$
(8)

式中, L_s' 为定子绕组暂态电感, $L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} = L_s + \frac{L_m L_m}{L_m + L_m}$; L_r' 为转子绕组暂态电感, $L_r' = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} = L_m + \frac{L_s L_m}{L_n + L_m}$ 。由于 R_{CB} 远大于 R_r ,故转子感应电流将会快速衰减。

3 仿真分析

图 5 所示为风电场仿真模型,单台 DFIG 参数见表 1,其他设备参数见表 2。使用 PSCAD/EMTDC 以实际风电场拓扑结构进行搭建,采用等容量等值聚合风电场模型等效 11 台 DFIG 并联连接。风机额定 风速为 11 m/s,发出电能由 690 V 经过箱式变压器升压至 33 kV,再经过升压变压器升压至 110 kV,最后 并入大电网。设置时间 t=1 s 时 110 kV PCC 母线处发生三相短路,短路持续时间为 0.6 s。



图 5 风电场仿真图 表 1 单台 DFIG 风机参数

参数	$P_{\rm R}/{ m MW}$	$U_{ m R}/{ m V}$	$\cos \varphi$	$R_{ m CB}/{ m p.}$ u.	$(I_{ m LR}/I_{ m R})/{ m p.}$ u.
数值	1.5	690	0.95	0.67	5.36
参数	$R_{ m s}/{ m p}$. u.	$L_{ m s\sigma}/ m p$. u.	$R_{ m r}/{ m p.}$ u.	$L_{ m r\sigma}/ m p$. u.	$L_{ m m}/{ m p.}$ u.
数值	0.005 4	0.10	0.006 0	0.11	4.50

表 2 其他设备参数							
参数	额定容量/MVA	阻抗电压/%					
箱式变压器	1.6	6.5					
升压变压器	50	14.5					

3.1 Crowbar 投入与否及阻值对风电场的影响分析

设置 Crowbar 投入时间为 0.5 s,仿真分析 Crowbar 不同投入情况的定转子电流、Crowbar 电流以及 电压跌落,表 3 为仿真结果。分析可知:①相较于未投入 Crowbar,投入 Crowbar 后电压跌落增加 5%左 右,不利于故障后电网恢复电压,但是定转子电流有所减小,达到了减小过流电流的目的,Crowbar 能够 分担一部分感应电流,有利于 DFIG 的安全运行,验证了前文分析的正确性。②随着 Crowbar 阻值的增 大,定转子电流越来越小,而 Crowbar 电流承担能力越来越大,但是电压跌落先减后增,不利于风电场 LVRT。说明并不是 Crowbar 阻值越大越好,而是在一定范围内存在最优值。

表 3	Crowbar 不同投入	、情况下的定转子电流和	Crowbar 电流及电压跌落对比
-----	--------------	-------------	-------------------

Crowbar 投入情况及阻值大小	转子电流/kA	定子电流/kA	Crowbar 电流 /kA	电压跌落/%
	1.766	7.260	0.000	41.379
是(阻值为 0.21 Ω)	0.999	5.101	1.003	34.483
是(阻值为 0.63 Ω)	0.453	3.735	2.511	37.931
是(阻值为 1.05 Ω)	0.309	3.295	3.669	36.207

为了进一步研究 Crowbar 阻值对风电场 LVRT 效果的影响,通过观察机端电压、转子电流和风电场 无功功率变化曲线了解更详细的暂态变化规律。设置 Crowbar 投入时间为 0.1 s,分别取 Crowbar 阻值 为 0.21 Ω 和 0.11 Ω 时的风电场进行仿真实验,图 6 为 DFIG 机端电压、转子电流和风电场无功功率仿真 结果。



对比图 6 发现除了符合由分析表 3 得出的结果外, Crowbar 阻值变大后, 转子电流衰减更快, 与前文理论

分析一致;Crowbar 阻值为 0.11 Ω时电压跌落程度较阻值为 0.21 Ω 严重,且从电网吸收最大无功也较多,加 重了电网电压跌落以及风电场 LVRT 的压力。综上所述,建议在合理范围内选取较大的 Crowbar 阻值。

3.2 Crowbar 投入时间对风电场的影响分析

设置 Crowbar 阻值为 0.11 Ω,分别取 Crowbar 投入时间为 0.2 s 和 0.05 s 时的风电场进行仿真实 验,图 7 为 DFIG 机端电压、转子电流和风电场无功功率仿真结果。



图 7 不同 Crowbar 投入时间下的 DFIG 机端电压、转子电流和风电场无功功率

分析图 7 发现:Crowbar 投入时间为 0.2 s时,风机持续定子电压偏低运行时间较长,而 Crowbar 投入时间为 0.05 s时,风机电子电压偏低,运行时间基本为 0,随着投入时间变小,风机定子电压偏低,运行时间越短,同样电网无功的时间也越短。但是 Crowbar 投入时间为 0.05 s时,转子电流变小与变大暂态过程重合,不仅没有有效地抑制转子过电流,而且还加大了转子电流的的暂态扰动。同时,由于 Crowbar 投入后 DFIG 相当于异步发电机,需要从电网吸收无功,且从图 7 无功仿真图中发现 1.6 s 故障结束时,风电场需要从电网再次吸收较多无功,而 Crowbar 切出时向电网发出较多无功。因此,建议 Crowbar 投入时间在合理范围内选取较小值,Crowbar 保护切出时刻应该尽可能在故障切除前且接近切除时刻。

4 结论

从 Crowbar 控制电路出发,对其工作原理进行分析,建立 DFIG 数学模型,得到含 Crowbar 的 DFIG 等值电路,通过公式推导发现 Crowbar 阻值能使 DFIG 的定子短路电流减小,加快转子短路电流衰减。 在此基础上搭建仿真模型,仿真结果不仅验证了理论分析的正确性,而且分析得到了 Crowbar 阻值和投 入时间以及切出时刻的选取思路:在合理范围内选取较大 Crowbar 阻值,投入时间较小值,且 Crowbar 保 护切出时刻应该尽可能在故障切除前且接近切除时刻,有利于提高风电场 LVRT 能力。

参考文献

[1] **焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述**[J]. 电网技术,2012,36(7):195-201.

[2]李建林,许洪华.风力发电系统低电压运行技术[M].北京:机械工业出版社,2008.

- [3] Hu Sheng, Lin Xinchun, Kang Yong, et al. An improved low-voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3653-3665.
- [4] Vidal J, Abad G, Arza J, et al. Single-phase DC Crowbar topologies for low voltage ride through fulfillment of high-power doubly fed induction generator-based windturbines J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3):768-781.
- [5]Sulla F, Svensson J, Samuelsson O. Short-circuit analysis of a doubly fed induction generator wind turbine with direct current chopper protection[J]. Wind Energy, 2013, 16(1): 37-49.
- [6] 段文辉,魏丽芳,王克谦,等.内置 Crowbar 电路的双馈风电机组短路特性研究[J].可再生能源,2018,36(3),405-410.

[7]叶希,鲁宗相,乔颖,等.大规模风电机组连锁脱网事故机理初探[J].电力系统自动化,2012,36(8):11-17.

[8] 尹俊,李彦彬,熊军华,等. 双馈风电场群短路电流计算与故障分析方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):113-122.

[9]张学广,徐殿国,李伟伟.双馈风力发电机三相短路电流分析[J].电机与控制学报,2008,12(5):493-497.

[10] 翟佳俊,张步涵,谢光龙,等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):18-23.

[11]杨淑英,孙灯悦,陈刘伟,等. 基于解析法的电网故障时双馈风力发电机电磁暂态过程研究[J].中国电机工程学报, 2013,33(S1):13-20.

[12]Jin Yang, 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.

[13]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.

[14]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.

- [15]**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.
- [16]姜惠兰,范中林,陈娟.动态调整转子撬棒阻值的双馈风电机组低电压穿越方法[J].电力系统自动化,2018,42(1): 125-131.
- [17]范小红,安德超,孙士云,等. 计及撬棒保护动作时间的双馈风机三相短路电流特性分析[J]. 电工技术学报,2019,34 (16):3444-3452.

Analysis and Simulation of the Influence of Crowbar Protection on LVRT of Wind Farm

Yang Weiwei¹, Wang Shuohe¹, Chen Jin²

School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 Kunneng Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: At present, the main means of fan low voltage ride through (LVRT) is the Crowbar protection and the switching of the converter, and the fault transient characteristics of the LVRT-capable doubly-fed induction generator (DFIG) have changed. The impact of Crowbar protection is important. In view of the above situation, firstly, the impact of Crowbar protection input on the short-circuit transient characteristics of the fan was studied. Secondly, the Crowbar protection input and the wind farm fault condition during the working of the converter were simulated and analyzed. Furthermore, the effects of Crowbar resistance and switching time on the short-circuit current of wind farm were analyzed. The simulation analysis of the example shows that the Crowbar resistance and its switching time will affect the short-circuit current of the wind farm. This research is of great significance for the design of wind farm protection and setting.

Key words: DFIG; Crowbar protection; short-circuit current; LVRT; PSCAD/EMTDC; wind farm