

风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究

向昌明¹, 范立新¹, 蒋一泉¹, 顾天畏², 顾伟²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 在江苏地区各风电场相关参数及低电压穿越能力测试数据的基础上, 在 DIgSILENT 中对基于双馈风电机组的大规模风电场进行建模, 可详细描述风电场内各风机低电压穿越的动态特性。在不同的电压跌落场景下, 对风电场内部各风电机组的不同故障反应特性进行比较分析, 确定整个风电场的低电压穿越能力并得出规律性结论。通过严重故障仿真得到风电场内部风机的脱网时序分布, 分析了风机之间交互影响机理与连锁脱网的详细过程。最后, 提出适当提高撬棒保护整定值、网侧变换器灵活运行和采用 SVC 等装置进行动态无功补偿可以提高风电场低电压穿越能力。

关键词: 风电场; 建模; 双馈机组; 低电压穿越; 撬棒保护; DIgSILENT

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.015

0 引言

随着大规模风电的并网运行, 并网风电的容量持续快速增长, 在电网故障下风电机组运行特性对电网安全稳定性的影响开始集中出现。其中, 低电压穿越能力 LVRT (Low Voltage Ride Through) 越来越受到关注, 已逐渐成为并网风电机组的必备功能之一^[1-2]。多个国家的风电并网运行导则都对风电场提出了风电机组必须具备低电压穿越能力的技术要求: 在规定的故障及外部电网电压跌落期间, 风电场能保证在一定时间范围内不间断并网运行而成功穿越低电压故障, 甚至要求风电场在电网故障发生后提供一定的无功功率以帮助电网电压恢复^[3]。近年来, 我国西北、华北地区风电机组大规模脱网事故频发, 大都是由于风电机组抵御电网电压扰动能力较差, 不具备低电压穿越能力所造成的, 这反映出了目前国内风电场在低电压穿越方面存在的诸多问题^[4]。为了保证接入电网的风电机组符合并网规定, 对现役风电场进行低电压穿越能力测试仿真评估已成为一项重要而迫切的任务。

基于双馈感应电机 DFIG (Doubly Fed Induction Generator) 的变速风电机组是目前风电市场的主流机型, 具有变速恒频运行的特性, 风能利用系数高; 能实现发电机输出有功、无功的解耦控制, 改善风电场的功率因数及电压稳定性^[5-7]。但由于 DFIG 定子侧直接与电网连接, 电网发生故障时, 电网电压跌落会直接导致机组机端电压跌落。为维持定子磁链不

变, 定子侧电流迅速增加, 并在转子侧感应出较大的转子过电流^[8]。另外, 电压降低会导致发电机电磁转矩减小, 引起风电机组超速, 影响风电场的安全运行。为限制转子过压过流和直流过电压, 防止损坏机组和转子侧变换器, 在不太严重的电网故障下, 可优先通过改进变换器控制策略增强 DFIG 低电压穿越能力^[8-9]。对于严重的电网故障, 则需要增加附加转子撬棒硬件保护电路为过电流提供流通回路^[10]。

在风电场仿真分析时, 一般认为一个风电场内部各台风机之间的电气联系紧密, 在系统大扰动故障情况下, 各台风机的反应相似^[11-12]。因此常把风电场看作是一个等效的整体来简化计算过程, 对于结论也并不会产生很大的误差。然而, 在研究风电场内部风机的动作特性时, 风电场实际运行特性与仿真结果均表明, 在电压跌落的扰动中, 风电场内部的所有风机由于感受到的短路阻抗不同, 并不总是体现出相似的运行特性^[11]。对于一些布置较为极端的风电场, 内部的风机甚至会存在明显的差异性。目前, 国内还很少有文献对此做出具体的研究分析。

本文为了表征出大规模风电场内部各风机在电网发生严重的短路故障下表现出的不同故障反应特性, 在 DIgSILENT/Power Factory 中对接入实际电力系统的整个风电场进行详细建模, 模型计及了风电场内部的集电线路损耗, 且每台风机均包括独立的原动机模型(风速模型、气动模型、机械模型、桨距控制模型)、转子侧变换器控制模型和网侧变换器控制模型^[13]。在此基础上对整个风电场的低电压穿越能力进行模拟仿真, 分析了在不同的电压跌落下风电机组的运行特性, 计算并确定整个风电场是否满足低电压穿越要求, 并提出了相应的改善措施。

1 风电机组低电压穿越能力

1.1 双馈风电机组的转子撬棒保护模型

DFIG 的转子撬棒保护如图 1 所示, 在低电压过

收稿日期: 2012-11-20; 修回日期: 2013-10-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A107); 国家自然科学基金资助项目(51277027, 50907008); 江苏省自然科学基金资助项目(SBK201122387)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A107), the National Natural Science Foundation of China(51277027, 50907008), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(SBK201122387)

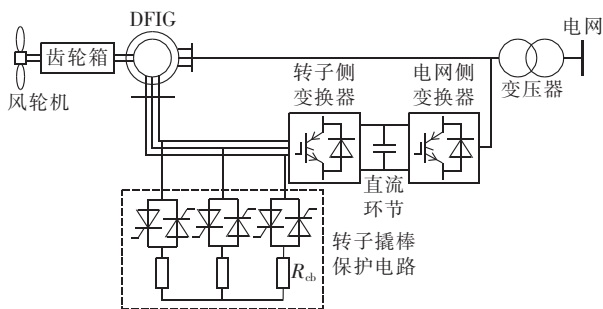


图 1 双馈风电机组结构
Fig.1 Structure of DFIG unit

程中用于保护变换器不被转子过电流所损坏。当转子侧电流达到预先设定的保护定值时,撬棒保护被触发,立即将转子绕组短接,电机中感应的过电流通过转子短路器的旁路流通,而不再流过变换器,转子侧变换器同时闭锁。在整个保护过程中,双馈风电机组将失去控制能力,整个 DFIG 工作在异步运行状态,会从电网吸收大量的无功功率,这将进一步促使机端电压下降,恶化电网故障恢复能力^[14-15]。

1.2 风电场低电压穿越能力

图 2 所示为中国风电机组的低电压穿越要求^[16]。图中, U 表示风电场变电站高压侧电压,为标幺值; t 表示时间,单位为 s。风电场并网点电压在图中电压轮廓线及以上的区域时,场内风电机组必须保证不间断并网运行;并网点电压在图中电压轮廓线以下时,场内风电机组允许从电网切出。

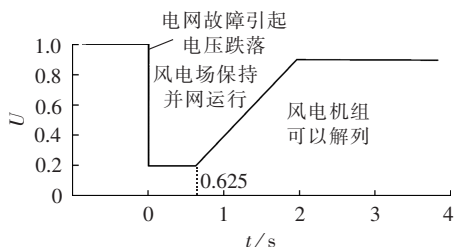


图 2 中国风电机组低电压穿越要求
Fig.2 LVRT requirement for wind turbine in China

中国规定的风电场低电压穿越要求具体如下。

a. 在电网电压恢复后对风电机组有功功率恢复的要求。对故障期间没有切出电网的风电场,其有功功率在故障切除后应快速恢复,自故障清除时刻开始,以至少每秒 10 % 额定功率的功率变化率恢复至故障前的值。

b. 在电网电压跌落期间风电机组的无功功率支撑能力的要求。假设电力系统发生三相短路故障,进而引起风电场并网点电压的跌落,如果其在额定电压的 20 %~90 % 区间内时,要求风电场具备无功支撑能力以辅助电网电压恢复。具体要求是从并网点电压跌落出现为起始点,风电场提供的无功支撑响应时间要 ≤ 75 ms,并能至少持续 550 ms。

2 基于 DIgSILENT 的风电场低电压穿越仿真

算例系统为某个接入无穷大系统的实际风力发电场,所涉及的模型及参数均来自该风电场的实际数据。该风电场如图 3 所示,布置 105 台 1.5 MW 的双馈风电机组,一期工程 58.5 MW,二期工程 43.5 MW,三期工程 55.5 MW。风电场配备 3 台额定容量为 50 MV·A 的主变,每台风电机组均配备额定容量为 1.6 MV·A 的箱变。风电场集电线路 11 回,采用 LGJF 型架空线路与 YJY23-26/35 kV 电缆混合线路。

在 DIgSILENT 中建立风电场详细模型,风电机组采用恒功率因数控制的双馈变速风电机组,定子出口额定电压为 690 V,电机参数为: $r_s=0.0023$ p.u., $x_s=0.021$ p.u., $x_m=1.108$ p.u., $r_r=0.0023$ p.u., $x_r=0.021$ p.u.。

风电机组的惯量为: $H_T=4.02$ s, $H_G=1.07$ s,轴系的刚度系数 $K_s=80.27$ (N·m)/rad,等效的阻尼系数 $D=1.5$ (N·m·s)/rad。撬棒保护旁路电阻 $R_{cb}=0.1$ p.u.,投入门槛电流 $i_{cb}=1.5$ p.u.,投入时间 $t_{lybass}=60$ ms。在暂态电压波动的过程中,认为风速是恒定的,且忽略尾流效应各风电机组均取额定风速 12 m/s,运行

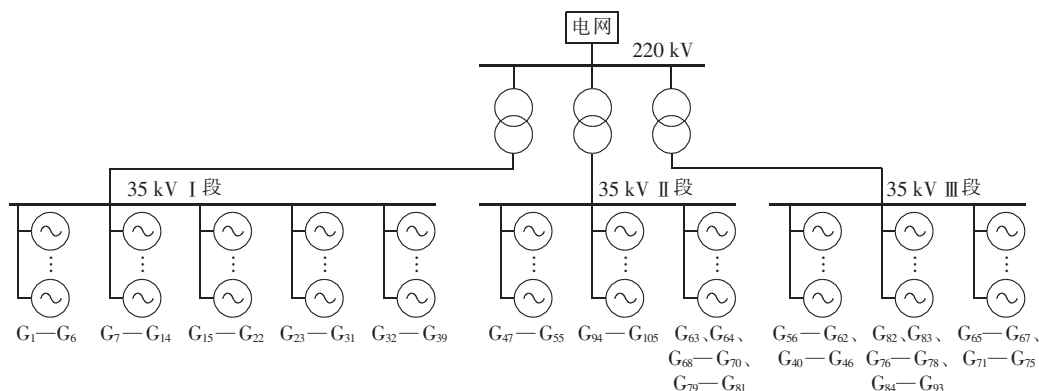


图 3 风电场电气接线图
Fig.3 Electrical wiring diagram of wind farm

在大功率输出($P > 90\% \times P_N$)范围内。

2.1 风电场侧故障仿真

风电场内各机组的低电压保护整定均按照图 2 所示曲线要求,即每台风机均具备了低电压穿越能力,对该情况下的风电场进行低电压穿越的仿真。

2.1.1 故障 1(故障深度 0.5 p.u.,持续时间 1.212 s)

取严重情况下的风电场侧故障,假定主变压器高压侧母线在 $t=0$ s 时刻发生三相短路故障,设置短路接地阻抗 $Z=0.2+j2.1$ p.u.,PCC 电压跌落到其额定值的 50%, $t=1.212$ s 时短路故障消除。对风电场中的 1~105 号机组进行测量,观察其机械和电气参数的变化。

该风电场内部各风机机端电压(标么值)、转子电流(标么值)、有功功率和无功功率出力曲线如图 4 所示。各风电机组机端电压(见图 4(a))跌落到其额定值的 62.3%~71.6% 不等,根据检测波形的大概形状可对风电机组进行分类归并。结合风电场内部各机组具体的接线长度和分布可发现,各机组机端电压主要取决于离故障点的电气距离。

如图 4(b)所示,各发电机的转子电流在电压跌落瞬间和恢复瞬间迅速增加达到其正常运行时的 2~3 倍,转子过流的程度与电网故障情况、故障地点离风电机组的远近有密切关系。该故障中虽然转子电流在 0 s 时刻超过了保护电流整定值 1.5 p.u.,但由于冲击电流时间太短(小于转子撬棒电路投入的判定时间 0.001 s),未达到的电流保护整定的触发条件,不需要将撬棒电路投入将转子绕组短接。

如图 4(c)所示,在故障期间,当 DFIG 端电压降低时,定子侧的有功功率输出能力会大幅下降,基本

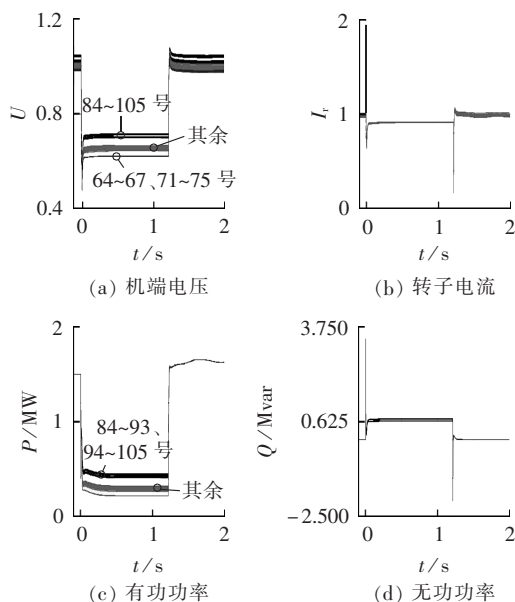


图 4 风电场各机组机端电压、转子电流、有功功率和无功功率变化曲线

Fig.4 Variation curves of stator voltage, rotor current, active power and reactive power of different units

与电网电压的跌落深度成比例关系。如图 4(d)所示,电网电压跌落后,无功功率输出相对给定的无功功率有所增加,在故障期间提供无功功率支撑,只是在电网电压跌落瞬间和恢复瞬间出现了波动。

由于该风电场属于狭长型风电场,场内的所有风机运行状况差异较大。图 5 为风电场内风电机组均运行在大工况($P > 0.9P_N$)下的潮流计算,绘制的各机组机端电压随线路长度的变化曲线,其中 1 期 39 台风机以 A#1 塔为参考点,2 期、3 期 66 台风机以另一座 A#1 塔为参考点。可见,一般各集电线路上的风机具有相似的电压水平,而位于风电场越末端的风机往往具有更高的电压水平,如 22 号风机电压为 0.978 p.u.,而 105 号风机电压为 1.049 p.u.。在故障期间,具有同样的规律,取本故障电压跌落最严重的 0.1 s 时刻,绘制各风电机组机端电压分布图如图 6 所示。可见,离短路点越近的风机面对的电压

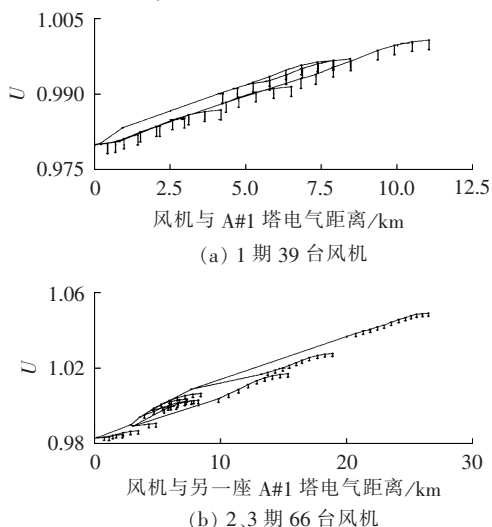


图 5 潮流计算各风电机组机端电压分布图
Fig.5 Stator voltage distribution of different units by load flow calculation

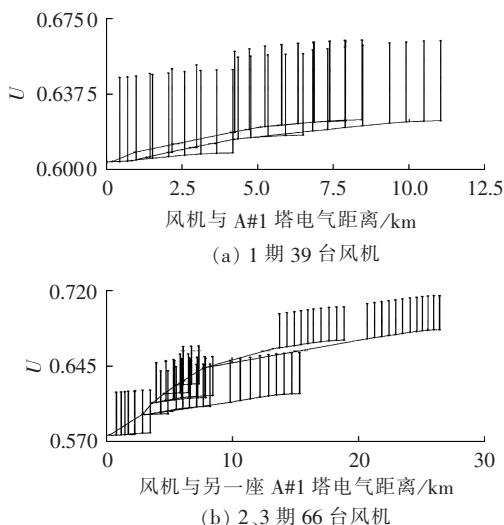


图 6 0.1 s 时间断面上各风电机组机端电压分布图
Fig.6 Stator voltage distribution of different units at 0.1 s

跌落越严重。

1 号风电机组转速(标么值)、桨距角、吸收风能功率(标么值)和风速曲线如图 7 所示。可见,由于故障后机端电压降低,风电机组送出的有功功率大幅下降,若风力机机械功率保持不变,机械转矩大于电磁转矩会引起风电机组转子加速,导致风电机组的转速保护动作,将风电机组切除。因此在低电压持续过程中需通过桨距角控制来配合降低风力机的机械转矩,从源头上减少风力机吸收的风功率,实现低电压穿越功能。DIgSILENT 中桨距角控制框图如图 8 所示,输入信号为实际发电机转子转速与故障情况下发电机转速给定值的偏差,当电网发生故障,风电机组转速超出其参考值时,桨距角控制开始动作,以降低风能捕获系数和风力机的机械转矩。

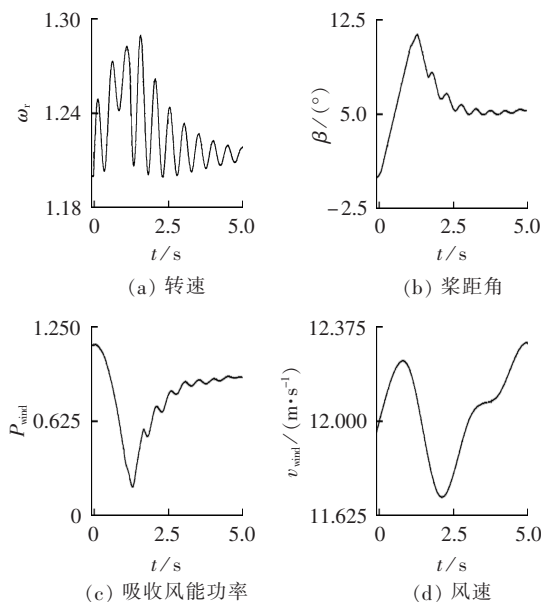


图 7 1 号风电机组转速、桨距角、吸收风能功率和风速

Fig.7 Rotor speed, pitch angle, wind power and wind speed of unit 1

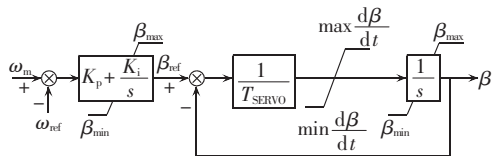


图 8 DIgSILENT 中的桨距角控制模块

Fig.8 Pitch angle control module in DIgSILENT

2.1.2 故障 2(故障深度 0.2 p.u.,持续时间 0.625 s)

假定并网点在 $t=0\text{ s}$ 时刻发生三相短路故障,设置短路接地阻抗 $Z=0.05+\text{j}0.54\text{ p.u.}$, $t=0.625\text{ s}$ 时短路故障消除。考察风电场内各机组均具有低电压穿越能力时各风机的电压跌落曲线。如图 9 所示,各机组机端电压呈现出差异较大的不同特性,可见对故障的反应具有较大的区别。

故障发生后,在 0.006 s 时刻,15~26、40~75、79~

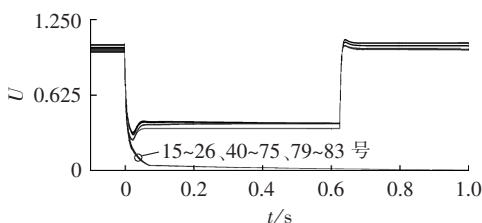


图 9 各风电机组电压跌落曲线

Fig.9 Voltage drop curve of different units

83 号机组转子电流超过预先设定的保护定值,撬棒保护动作将转子绕组短接,进入异步电机运行状态。随后,各达到电压 0.2 p.u.下限的风机低电压保护启动,定子并网接触器相继动作,脱网时序见表 1。

表 1 风电场风机脱网时序

Tab.1 Wind turbine trip-off sequence of wind farm

时间/s	风机动作事件
0.0060	15~26、40~75、79~83 号撬棒保护动作
0.0185	65~67、71~73 号脱网
0.0194	74、75 号脱网
0.0203	63、64 号脱网
0.0212	22、23、68 号脱网
0.0221	17~21、24、25、45、46、55、59~62、69、70、79~81 号脱网
0.0230	15、16、26、40~44、47~54、56~58、82、83 号脱网

从风电场脱网时序可以看出,离短路点电气距离越近的风机越早脱网,且每条集电线路按照由近到远的过程连锁脱网。最终在该故障下,有 53 台风机由于低电压切除运行。如图 10 所示,位于风电场脱网域内的风机将会无法穿越低电压故障。在 PCC 故障电压为 0.2 p.u.时,虚线区域内的风机在低电压期间将会无法穿越故障;在 PCC 故障电压为 0.179 p.u.时,点划线区域内的风机在低电压期间将会无法穿越故障;在 PCC 故障电压为 0.127 p.u.时,风电场所有风机均无法穿越故障。可见,即使风电场所有风机均具有低电压穿越能力,风电场仍会出现部分风机脱网的情况。这是由于风电场内部各风机的布局不同,单台风机具有不同的特性且风机之间存在相互的影响造成的,因而对同一故障感受到的严重程度并不相同。

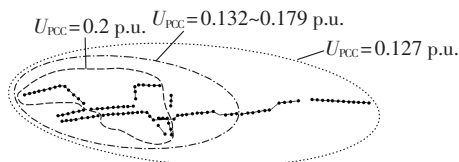


图 10 风电场脱网域示意图

Fig.10 Trip-off area of wind farm for different voltage sags

2.1.3 故障 3(故障深度 0.7 p.u.,持续时间 2 s)

假定并网点在 $t=0\text{ s}$ 时刻发生三相短路故障,设置短路接地阻抗 $Z=0.2+\text{j}4.7\text{ p.u.}$, $t=2\text{ s}$ 时短路故障消除,考察故障持续时间较长情况下各风机的电压

跌落曲线。如表 2 所示,风电场内所有机组在 140 ms 内相继脱网,由于故障瞬间电压下降速率不是很大,全过程所有机组并未涉及撬棒保护动作。

表 2 风电场风机脱网时序	
Tab.2 Wind turbine trip-off sequence of wind farm	
时间/s	风机动作事件
1.7669	65~67、71~75 号脱网
1.7844	18~24、63、64、68 号脱网
1.8084	4~6、10~17、25~35、40~46、53~62、69~70、79~83 号脱网
1.8093	51、52 号脱网
1.8333	1~3、7~9、36~39、47~50、76~78 号脱网
1.8588	84 号脱网
1.8854	85~93 号脱网
1.9074	94~105 号脱网

如图 11 所示,在 1.7669 s,由于风电场母线近端 8 台机组(①)电压水平最低,首先达到图 2 所示低电压轮廓线以下,从电网切除,并在脱网时刻引发剩余机组电压再次下降。在 1.7844 s,10 台机组(②)运行至低电压轮廓线以下,从电网切除,且在脱网时刻引发剩余机组电压再次下降。依此类推,至 1.9074 s 风电场所有机组全面崩溃。可见风电场内部各风机之间存在较强的耦合关系,当某群机组脱网后会交互影响剩余的机组电压再次恶化,从而诱发更多的机组从风电场脱离。

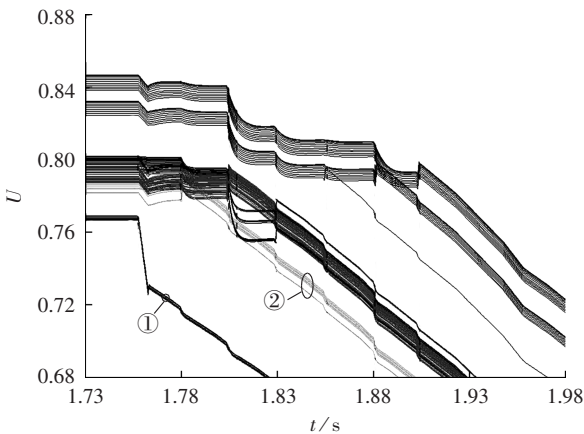


图 11 各风电机组脱网时序示意图
Fig.11 Schematic diagram of wind turbine trip-off sequence

2.2 风电场含部分无穿越能力的风电机组情况仿真

若风电场某线 14 台风机不具备低电压穿越能力,考察风电场含部分无穿越能力风机对整个风电场的影响。假定并网点在 $t=0$ s 时刻发生三相短路,故障深度 0.24 p.u.,持续时间 0.625 s。

如图 12 所示,在同样的故障情况下,由于 56~62、40~46 号的风机不具备低电压穿越能力,电压过低导致提前跳闸切除,导致风电场 65~67、71~75 号机组从风电场脱网。其脱网的原因演化过程如下:电压第一次下降,由于短路故障导致机组机端电压降

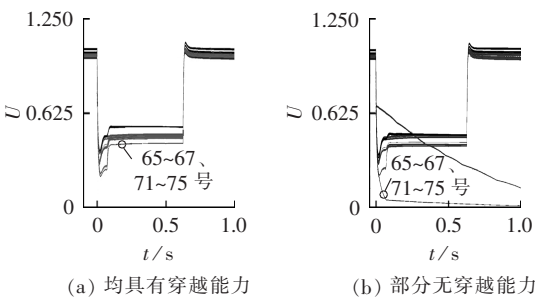


图 12 各风电机组电压跌落曲线 1
Fig.12 Voltage drop curve 1 for different units

落;电压第二次下降,在 0.003 s 时刻,部分无低电压能力的风机提前跳闸切除,场内集电线路送出的功率减小,集电线路上的电压降落变小,由于场内风机电压均高于母线电压,从而恶化剩余机组机端电压进一步下降;电压第三次下降,在 0.006 s 时刻,撬棒保护动作,进入异步电机运行状态吸收大量无功功率促使电压进一步下降。最终在 0.024 s 时刻,从风电场切除运行。

3 改善风电场低电压穿越能力的措施

假定并网点在 $t=0$ s 时刻发生三相短路故障,设置短路接地阻抗 $Z=0.07+j0.72$ p.u.,PCC 电压跌落到其额定值的 25%, $t=0.625$ s 时短路故障消除。如图 13 所示,为风电场无撬棒保护与装设有撬棒保护 2 种情况下各风电机组的机端电压曲线。在配置有撬棒保护时,由于 65~67、71~75 号机组转子电流超出 1.5 倍转子额定电流,0.006 s 时刻保护动作将转子绕组短接。整个 DFIG 切入普通异步发电机运行状态,从电网吸收大量的无功功率,进一步恶化了电压的下降。从曲线下陷的深度可发现,撬棒保护投入很大程度地加大了风电场某些机组脱网的可能性。

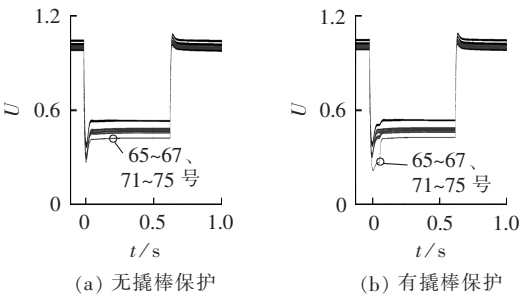


图 13 各风电机组电压跌落曲线 2
Fig.13 Voltage drop curve 2 for different units

3.1 提高转子电流保护整定值

为了降低撬棒保护对电流的敏感,减少动作次数,可以在保证转子侧变换器安全的条件下,适当提高撬棒保护触发电流定值,这可以增强风电场的低电压穿越能力。假定并网点在 $t=0$ s 时刻发生三相短路,故障深度 0.2 p.u.,持续时间 0.625 s。考察风电机组撬棒保护触发电流限值 $i_{cb}=1.5$ p.u.与 $i_{cb}=2.0$ p.u.

的 2 种情况。这 2 种情况下撬棒保护超过电流定值的判定时间均为 0.001 s, 保护电路均在固定的 60 ms 后自动切除。

如图 14 所示, 当 $i_{cb}=1.5$ p.u. 时, 63~69、71~75 号机组转子电流超出 1.5 倍转子额定电流, 在 0.006 s 时刻其撬棒保护动作导致其机端电压下降, 在 0.021 s 时刻风机低电压保护启动, 该 12 台风机均从风电场脱网。在将 i_{cb} 提高到 2.0 p.u. 后, 风电场风电机组无撬棒保护动作, 全部成功穿越故障, 低电压穿越能力明显得到了提高。

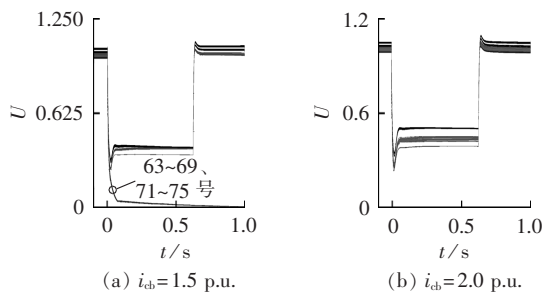


图 14 各风电机组电压跌落曲线 3

Fig.14 Voltage drop curve 3 for different units

3.2 网侧变换器作无功补偿装置运行

在正常工作情况下, 网侧变换器运行在单位功率因数下尽可能为转子侧变换器提供有功功率。在一般普通故障下, 转子侧变换器未被短路时, 可通过转子侧变换器进行无功控制, 修改转子侧变换器无功功率给定值 Q_{ref}^* , 为电网电压提供支持。在严重电网故障时, 转子侧变换器由于被撬棒保护装置短路失去控制能力, DFIG 切入异步运行状态, 并从电网吸收大量的无功功率, 进一步恶化了系统电压的恢复能力。而此时, 网侧变换器并没有被阻断, 完全可以工作在 STATCOM 状态来产生尽可能多的无功功率为电网电压提供支撑。因此, 在转子侧变换器被短路期间, 可以通过将网侧变换器从正常的零无功控制模式切换到电压控制模式, 修改网侧变换器无功功率给定值 Q_{g-ref}^* , 来提高电网转子短路时 DFIG 的无功支撑能力。当故障清除, 电压重建后, 转子侧变换器再重新启动, 风电机组回到正常运行状态。

3.3 配置一定容量的无功补偿装置

为了提高风电场低电压穿越能力, 改善电网故障恢复能力, 可加装 SVG、SVC 等补偿装置进行动态无功补偿。在本模型风电场 35 kV II 段母线侧配置 SVC 无功补偿装置, 其中 TCR 支路 47 Mvar, FC 支路 47 Mvar (按整个风电场装机容量的 30% 补偿)。在故障深度 0.7 p.u.、持续时间 1.8 s 下进行仿真比较。如图 15 所示, 风电场无 SVC 装置下共 49 台风机脱网, 配置 SVC 改善风电场暂态电压稳定性后, 共 21 台风机脱网, 风电场低电压穿越能力得到了有效的改善。可见, 配置的 SVC 能够根据风电场电压水平

变化提供动态的无功支持 (如图 16 所示), 帮助风电机组故障后恢复机端电压。但是由于 SVC 装置的补偿能力受机端电压影响比较大, 在外部电网电压偏低时, 补偿效果相对于额定电压时有所下降。在电压重建期间, 无功功率支撑能力逐渐变强, 有利于电网电压的恢复。

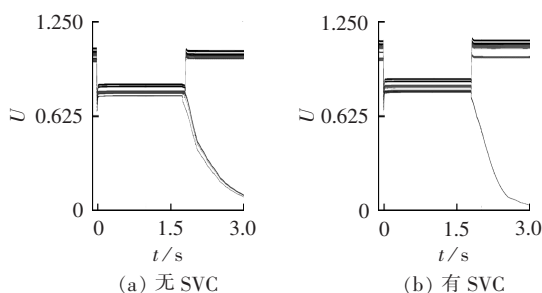


图 15 各风电机组电压跌落曲线 4

Fig.15 Voltage drop curve 4 for different units

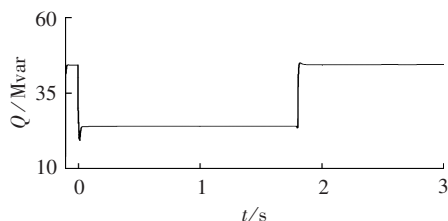


图 16 SVC 的无功特性曲线

Fig.16 Reactive power characteristic curve of SVC

4 结论

本文在风电场低电压穿越测试数据及相关参数的基础上, 基于 DIgSILENT 对大规模风电场详细建模。对整个风电场的低电压特性进行详细描述, 计算确定整个风电场低电压穿越能力。在风电场布置图上, 以直观的区域简单划分出电压跌落对风电场范围内风电机组的影响程度。分析得到如下结论。

a. 在低电压期间, 风电场内部各机组运行状况存在不同程度的差异性, 机端电压主要取决于与短路点间的电气距离, 因此各风机对同一故障感受到的严重程度并不相同, 且风机转子过流程度也与电网故障情况、故障地点离风电机组的远近有密切关系。

b. 风电场内部各风机之间存在较强的耦合关系, 脱网时序按照每条集电线路由近到远的过程连锁脱网。某群机组脱网后, 会交互影响剩余的机组电压再次恶化, 从而诱发更多的机组从风电场脱离。

c. 在条件允许情况下, 适当提高撬棒保护整定值, 网侧变换器灵活运行和采用 SVC 等装置进行动态无功补偿均有利于提高风电场低电压穿越能力。

参考文献:

- [1] MORREN J, de HAAN S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.

- [2] ABBEY C, JOOS G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) characteristic on voltage stability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 1-7.
- [3] JAUCH C, MATEVOSYAN J, ACKERMANN T, et al. International comparison of requirements for connection of wind turbines to power systems[J]. Wind Energy, 2005, 8(3): 295-306.
- [4] 国家电力监管委员会. 关于切实加强风电场安全监督管理遏制大规模风电机组脱网事故的通知[R]. 北京: 国家电力监管委员会, 2011.
- [5] HANSEN A D, HANSEN L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004)[J]. Wind Energy, 2007, 10(1): 81-97.
- [6] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU Xueguang, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 803-809.
- [7] DATTA R, RANGANATHAN V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-a comparison with alternative schemes[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3): 414-421.
- [8] XIANG Dawei, RAN L, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [9] 朱颖, 李建林, 赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 20-24.
- ZHU Ying, LI Jianlin, ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 20-24.
- [10] SEMAN S, NIIRANEN J, ARKKIO A. Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1782-1789.
- [11] AKHMATOV V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2003.
- [12] SLOOTWEG J G, KLING W L. Aggregated modelling of wind parks in power system dynamics simulations[C]//IEEE Power Tech Conference. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 626-631.
- [13] YAZHOU L, MULLANE A, LIGHTBODY G, et al. Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 257-264.
- [14] 穆钢, 王健, 严干贵, 等. 双馈型风电机组近满载工况下连锁脱网事件分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 35-40.
- MU Gang, WANG Jian, YAN Gangui, et al. Cascading trip off of doubly-fed induction generators from grid at near full load condition in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 35-40.
- [15] 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 wind turbines from power grid and its demand on reactive power[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 158-163.
- [16] 王继东, 张小静, 杜旭浩, 等. 光伏发电与风力发电的并网技术标准[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 1-7.
- WANG Jidong, ZHANG Xiaojing, DU Xuhao, et al. Standards of grid connection technology for photovoltaic and wind power generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 1-7.

作者简介:

向昌明(1965-), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事源网协调方面的研究;

范立新(1966-), 男, 安徽巢湖人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电气试验和继电保护方面的研究工作;

蒋一泉(1978-), 男, 江苏扬州人, 高级工程师, 主要从事继电保护方面的研究工作;

顾天畏(1989-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为风电并网技术(E-mail: gutianwei@yeah.net);

顾伟(1981-), 男, 江苏徐州人, 副教授, 博士, 主要从事智能电网、可再生能源接入技术及电能质量分析控制等方面的研究。

Analysis of cascading trip-off mechanism and low voltage ride through capability of wind farm

XIANG Changming¹, FAN Lixin¹, JIANG Yiquan¹, GU Tianwei², GU Wei²

(1. Jiangsu Fangtian Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the tested LVRT (Low Voltage Ride Through) data and relative parameters of wind farms in Jiangsu, a model is built in DiGSILENT for a large-scale wind farm based on doubly-fed induction generators, which describes in detail the dynamic LVRT characteristics of different wind turbines within the farm. The responses of different wind turbines to different voltage sags are compared and analyzed to evaluate the LVRT capability of the farm. The principle conclusions are summarized. The cascading trip-off sequence during a serious incident is obtained by simulation and the mechanism of interaction between turbines is analyzed to illustrate the cascading trip-off process. For enhancing the LVRT capability of wind farm, measures are proposed: properly increase the setting value of crowbar protection, flexibly operate the grid-side converter and apply SVC.

Key words: wind farms; model buildings; doubly-fed induction generator unit; low voltage ride through; Crowbar protection; DiGSILENT