

# 风电场柔性直流输电的故障穿越方法对风电机组的影响

厉璇<sup>1</sup>, 宋强<sup>2</sup>, 刘文华<sup>2</sup>, 马玉龙<sup>1</sup>

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京市 102209; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084)

**摘要:** 柔性直流输电(VSC-HVDC)系统是大型风电场并网的较好选择,当发生交流系统故障时,故障穿越控制器可维持该系统的稳定性。然而,控制器会对风电机组造成一定影响。针对大型风电场VSC-HVDC系统接入的故障穿越问题,文中首先在PSCAD/EMTDC中建立了含有普通异步/双馈风电场详细模型的两端VSC-HVDC系统仿真模型,并验证了升频法和降压法两种典型的故障穿越方法。然后进一步研究了不同类型风电机组在不同的故障穿越方法下的特性和差异,从而得出风电场VSC-HVDC系统的故障穿越方法对风电机组的影响规律。研究得出的结论可以为不同类型的风电机组接入VSC-HVDC系统时故障穿越方法的选择提供一定的参考依据。

**关键词:** 风力发电; 大型风电场; 柔性直流输电; 故障穿越; 低电压穿越

## 0 引言

柔性直流输电(VSC-HVDC)是应用可关断电力电子器件构成的电压源换流器(VSC)输电方式,它实现了有功功率和无功功率的独立控制,具备良好的动态无功支撑能力,可改善系统的故障特性;另外,VSC-HVDC系统实现了送端系统与受端系统的解耦,若应用于风电场并网<sup>[1]</sup>,可改善风电场抵抗来自电网系统干扰的能力,也能在一定程度上防止风电场的电压波动对电网的影响。因此,VSC-HVDC系统是大型风电场并网的较好选择<sup>[2]</sup>。

在新型输电方式逐渐步入工程实际的背景下,风电机组故障穿越<sup>[3-4]</sup>这一概念被赋予了新的内涵。在VSC-HVDC系统中,风电场通过整流站接入高压直流系统,并通过逆变站并入交流电网,当交流电网发生短路故障时,电网侧换流站(GSVSC)输出功率减少,而风电场输出功率不变,从而引起系统输入和输出功率不平衡,使得直流电压上升<sup>[5]</sup>,严重情况下可能导致整个直流系统的崩溃。因此,必须对换流站进行控制以实现整个系统的故障穿越。针对这一问题,很多学者展开了相关研究<sup>[6-9]</sup>。文献[6]提出在交流电网短路故障后增加风电场频率以迅速降低风电场电磁功率,该方法设计了频率控制器,当直流电压超过阈值时按比例提高风电场频率。文献[7]提出降低风电场交流电压的方法,将直流电压与阈值的差值输入到比例-积分(PID)控制器中,并将产生的电压负增量作为风电场侧换流器参考电压的

下降值,从而迅速降低风电场的电磁功率。然而,文献[8]注意到,风电场交流电压迅速降低会带来典型风电机组短路电流,因此基于降压法引入虚拟变流器磁通以达到去磁的目的,其优点在于在允许快速电压削减的同时避免了电力和机械设备的高应力。同时,文献[9]提出在交流电网故障期间短时闭锁风电场侧换流器,并设计了故障检测处理控制器以减轻故障后的暂态扰动,该方法并未从根本上降低风电机组的电磁功率,而是通过强制手段阻止功率输入直流系统,控制效果不是很好。上述研究均专注于风电场VSC-HVDC系统交流电网短路故障时系统的故障穿越问题,虽然可以抑制直流电压的上升,实现系统的故障穿越,但各种故障穿越方法必然会对风电机组造成一定的影响。因此,从风电机组安全保护的角度而言,需要考虑新型输电方式下交流电网发生故障时选择故障穿越方法的原则。

本文为研究风电场VSC-HVDC的故障穿越问题,在PSCAD/EMTDC中建立了含有普通异步/双馈风电场详细模型的两端VSC-HVDC系统仿真模型,并采用升频法/降压法作为其典型的故障穿越方法。验证了两种故障穿越方法的可行性,并在此基础上研究了不同类型风电机组在不同故障穿越方法下的特性和差异。最后,得出相关结论,并从风电机组安全保护的角度分别给出普通异步/双馈风电场VSC-HVDC系统选择故障穿越方法的建议。

## 1 风电场VSC-HVDC系统建模方法

### 1.1 系统介绍

本文对两端VSC-HVDC系统进行研究,其示

意图如图 1 所示。风电场类型为普通异步或双馈, 经过风电场侧换流站 (WFVSC) 整流后接入高压直流网络, 再经 GSVSC 逆变后并入无限大交流电网。

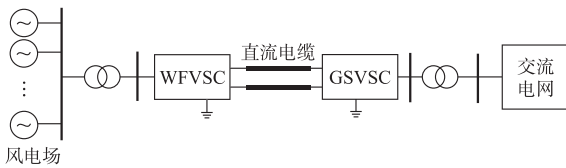


图 1 两端 VSC-HVDC 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of two terminal VSC-HVDC system

## 1.2 风电场建模与控制

对风电场进行详细建模。普通异步发电机是国内普遍采用的风力发电机。其结构简单, 如图 2 所示, 由定速风轮机和鼠笼式异步发电机<sup>[10]</sup> 构成, 依靠从系统吸收无功功率来建立磁场, 它的控制可通过并联电容器组的投切来实现。为建立大型风电场模型, 本文参照文献<sup>[11]</sup> 的等效电流源法, 将其余  $N-1$  台风电机组等值成  $N-1$  个受控电流源, 控制量即为原风电机组模型出口电流  $i_{abc}$ , 从而在利用单台风电机组模型真实模拟实际风电机组参数的同时节省大量仿真时间。对该方法进行适当改进, 根据实际情况计入尾流效应因子, 可通过函数耦合到自定义风电机组模型参数  $k$  中, 不计入时取  $k=1$ 。

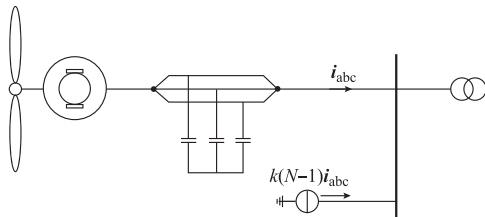


图 2 普通异步风电场建模

Fig.2 Modeling of wind farm with conventional asynchronous generators

双馈感应发电机 (DFIG) 是目前比较流行的风力发电机, 可以实现变速恒频功能, 将会在将来的风力发电系统中占有重要地位<sup>[12]</sup>。双馈风电场建模与控制如图 3 所示。

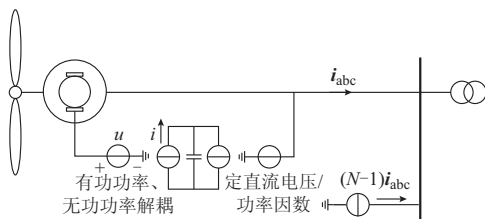


图 3 双馈风电场建模与控制

Fig.3 Modeling and control of DFIG-based wind farm

双馈风电机组结构类似于普通异步风电机组, 不同之处在于转子经过背靠背变流器接入电网。网侧变流器控制直流环节电压及转子向电网输送无功功率, 转子侧变流器则实现整个风电机组有功功率和无功功率的解耦。

对双馈风电机组模型采用两个简化手段。首先, 由于脉宽调制 (PWM) 控制变流器的开关频率高, 电磁暂态仿真效率受到极大约束, 因此根据文献<sup>[13]</sup> 对背靠背变流器进行等效简化, 并进行部分改进。网侧变流器采用  $dq$  解耦的动态电流控制, 交流侧电压  $u_c$  受调制比  $M$  和移相角  $\delta$  控制, 具有受控电压源<sup>[13]</sup> 特性:

$$u_c = M \frac{u_d}{2} \sin(2\pi ft - \delta) \quad (1)$$

式中:  $u_d$  为变流器直流电压;  $f$  为交流侧电压频率 (即电网基频 50 Hz)。

$u_c$  用受控电压源  $u$  代替, 控制量为三相参考电压值。

对于网侧变流器直流侧, 注入功率和直流电压决定直流注入电流  $i_d$ , 具有受控电流源<sup>[13]</sup> 特点:

$$i_d = \frac{P_c}{u_d} = \sum_{x=a,b,c} \frac{u_{cx} i_{cx}}{u_d} \quad (2)$$

式中:  $P_c$  为变流器功率 (即通过网侧变流器的功率, 方向为直流侧至交流侧或交流侧至直流侧);  $u_{cx}$  和  $i_{cx}$  分别为变流器交流侧  $x$  相电压和电流。

转子侧变流器采用三相  $abc$  下的直接电流滞环控制, 变流器直流侧同样用受控电流源等效; 而对于转子侧变流器交流侧, 由于采用不规则的 PWM 控制, 无法模拟基波受控电压源的特性, 因此利用滞环原理控制受控电压源  $u$ , 当上开关管导通时令受控电压值为  $u_d/2$ , 反之则为  $-u_d/2$ 。

双馈风电场等值建模方法与普通异步风电场相同。

## 1.3 换流站建模与控制

正常运行状态下, GSVSC 采用  $dq$  解耦的动态电流控制, 外环为定直流电压/定无功功率控制模式, 以维持直流线路电压  $U_{dc}$  的稳定; WFVSC 采用定交流电压控制模式, 直接控制变流器电压的调制比和相角, 为风电场提供电压源接口<sup>[14]</sup>。

当交流电网发生短路故障时, 直流系统两端功率不平衡导致直流电压迅速上升, 必须通过快速控制降低直流过电压。在文献<sup>[6-9]</sup> 的基础上且考虑实际工程情况, 故障穿越控制均由 WFVSC 完成, 而 GSVSC 控制策略不变。

重点考虑 WFVSC 的控制。本文假设在没有任何通信手段的情况下, 交流电网故障的检测只能通

过高压直流联络线直流电压的测量来进行。本文设计了一种防止功率振荡的故障检测器,如图 4 所示。WFVSC 通过测量直流电压信号  $U_{dc}$  并与阈值  $U_{thr}$  比较得到过电压参考信号 BRK,该信号直观反映了直流线路上电压越限的情况。为了防止 BRK 信号导致故障穿越控制器的多次启动,增设单稳触发器,仅采用 BRK 的第一个有效区间。图 4 中的 Control 信号可直接作为故障穿越控制器的触发信号。

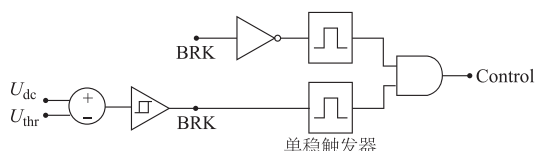


图 4 WFVSC 处的故障检测器  
Fig.4 Fault detector at WFVSC

故障穿越方法从原理上可分为升频法、降压法和换流器短时闭锁法 3 种。其中,升频法和降压法均是通过 WFVSC 的控制降低风电场的电磁功率,而换流器短时闭锁法则是强行阻止功率输入直流系统,控制效果较差,因此采用升频法或降压法作为风电场 VSC-HVDC 系统的典型故障穿越方法。

文献[6, 15]将控制方法简单化,设计的两种 WFVSC 控制器如图 5 所示。

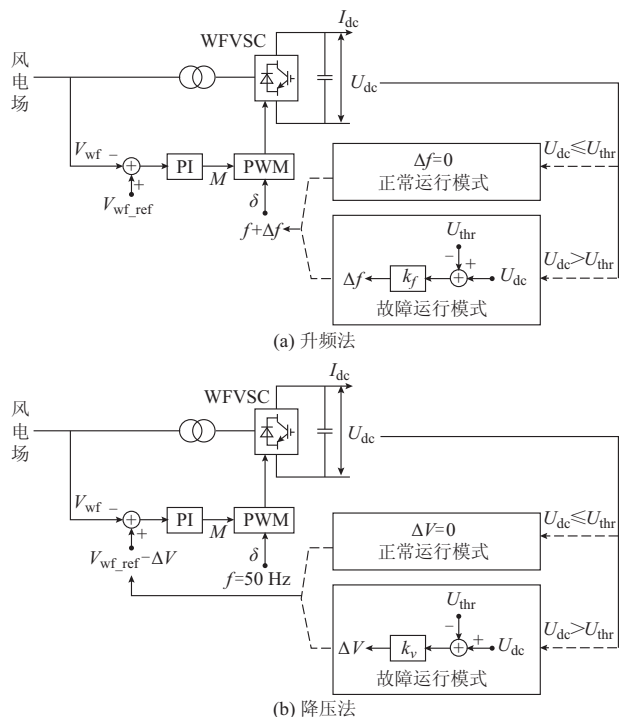


图 5 WFVSC 控制器  
Fig.5 WFVSC controller

如图 5(a) 所示,实现 PWM 必须获得  $M$  和  $\delta$ 。 $V_{wf}$  为风电场出口交流电压幅值, $V_{wf\_ref}$  为风电场出

口交流电压幅值参考值, $M$  可由二者得到; $\delta$  可由相应频率得到,频率的计算方法如下。

当直流电压  $U_{dc} \leq U_{thr}$  时,WFVSC 处于正常运行模式, $f$  是风电场交流电网的基频数值(50 Hz),可为风电场提供 50 Hz 的电压源接口;当直流电压  $U_{dc} > U_{thr}$  时,WFVSC 将交流风电场频率提高为:

$$f_{wf} = f + \Delta f = f + k_f (U_{dc} - U_{thr}) \quad (3)$$

其中, $k_f$  可设计为:

$$k_f = \frac{\Delta f_{max}}{U_{max} - U_{thr}} \quad (4)$$

式中: $\Delta f_{max}$  为最大频率变化量; $U_{max}$  为未采取故障穿越控制时直流电压所能达到的最大值。

通过频率的提升可迅速降低风电场输出的电磁功率。

如图 5(b) 所示,控制频率为 50 Hz; $M$  的计算方法如下。正常运行模式下  $M$  的计算方法与升频法的相同;在故障运行模式中,降低 WFVSC 参考电压,并通过 PI 控制器使得交流风电场电压无差跟踪参考电压:

$$V_{wf} = V_{wf\_ref} - \Delta V = V_{wf\_ref} - k_v (U_{dc} - U_{thr}) \quad (5)$$

其中, $k_v$  可设计为:

$$k_v = \frac{V_{wf\_ref}}{U_{max} - U_{thr}} \quad (6)$$

通过电压的降低同样可迅速降低风电场输出的电磁功率,最严重情况下将风电场电压降至零。

同时,由于 WFVSC 输出的电压存在谐波,为给风电场提供较为理想的电压源接口,需要根据谐波情况设计滤波器。

## 2 故障穿越控制对风电机组的影响

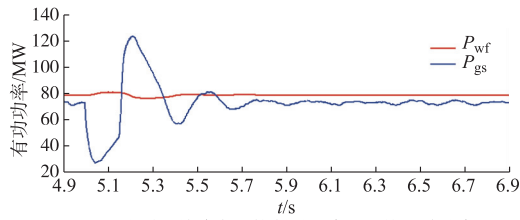
为验证模型的有效性与控制效果,进而探讨风电场 VSC-HVDC 系统的故障穿越方法对风电机组的影响,按照以上介绍的建模方法在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的两端 VSC-HVDC 系统。两个换流站额定容量均为 200 MW,交流侧额定电压为 86.89 kV,采用两电平结构,开关频率为 3.2 kHz。100 台额定容量为 1 MW 的风电机组组成风电场,风电机组出口电压为 0.69 kV,经升压、汇流及整流接入额定电压为  $\pm 80$  kV 的直流输电系统,再逆变及升压至 110 kV 并汇入交流电网。在仿真进行 5 s 时设置持续 0.15 s 的瞬时性交流电网三相接地短路故障,用以代表瞬时性短路故障的典型情况。

### 2.1 故障穿越控制效果

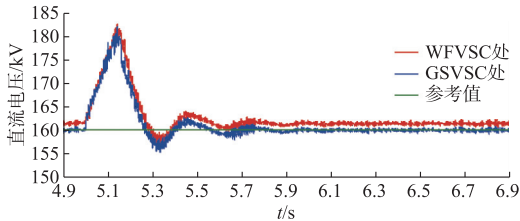
以普通异步风电场为例,交流电网故障时的直流系统响应如图 6 所示。由图 6(a) 和 (b) 可知,未

采取故障穿越控制时 GSVSC 输出功率  $P_{gs}$  下降且故障后存在较大波动,而 WFVSC 持续不变地向直流系统注入有功功率  $P_{wf}$ ,略去系统损耗的输入和输出功率差额使 GSVSC 输出电流达到极限,失去电压控制能力,导致直流电压  $U_{dc}$  迅速上升至 182.5 kV,达到额定电压的 114.1%。由图 6(c)和(d)可知,采用升频法后,直流电压上升并激活故障穿越控制器,最终上升至 167.5 kV(104.7%额定电压),采用降压法后直流电压上升至 169 kV(105.6%额定电压),控制效果大致相同。

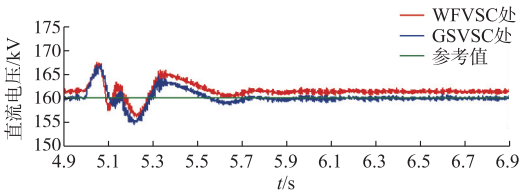
代表降压法下的响应。由图 7(a)和(b)可知,交流电网故障后采用降压法时转速  $W_{pu-U}$  (标么值)和有功功率  $P_{wf-U}$  恢复更快且波动幅度较小。由图 7(c)和(d)可知,采用降压法时风电场交流母线电压  $V_{wf-U}$  (标么值)跌落程度较深,从直流系统吸收的无功功率  $Q_{wf-U}$  较多;而采用升频法时,虽然 WFVSC 的参考电压幅值不变,但风电场汇流母线电压  $V_{wf-F}$  仍会受到一定影响,电压幅值下降,风电场仍需吸收一定无功功率  $Q_{wf-F}$ 。



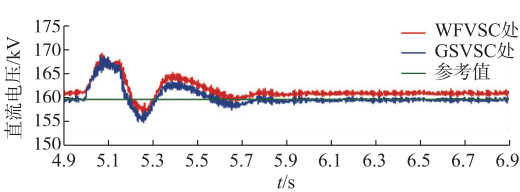
(a) 未采取故障穿越控制时的直流系统两端功率



(b) 未采取故障穿越控制时的直流电压响应



(c) 升频法下的直流电压响应



(d) 降压法下的直流电压响应

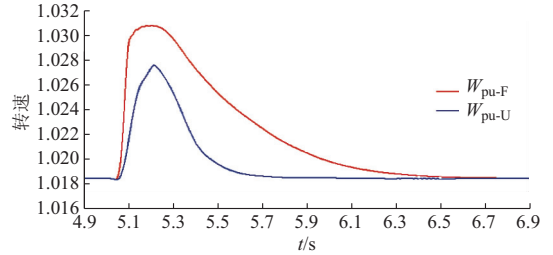
图 6 交流电网故障时的直流系统响应

Fig.6 Response of DC system under an AC grid fault

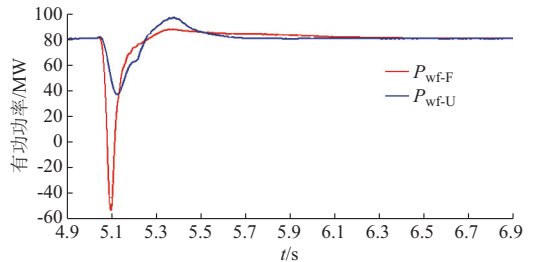
由上述结果可知,升频法和降压法均可抑制两端功率不平衡所导致的直流过电压,并可通过调节故障穿越控制方法的控制参数使得直流电压的控制效果大致相同。故障结束后系统功率和直流电压均恢复正常运行水平,从而验证了故障检测器防止功率振荡的效用。

## 2.2 故障穿越控制对普通异步风电机组的影响

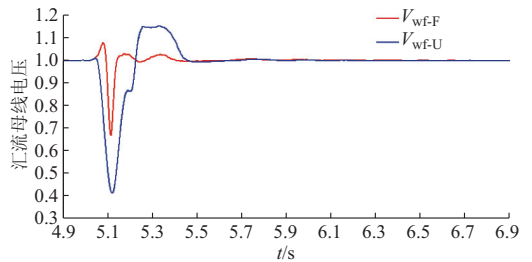
两种故障穿越方法下普通异步风电机组的响应如图 7 所示,下标 F 代表升频法下的响应,下标 U



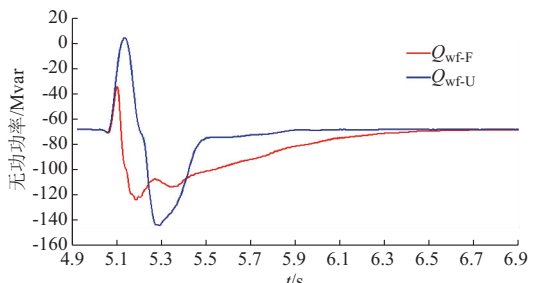
(a) 风电机组转速



(b) 风电场有功功率



(c) 风电场汇流母线电压



(d) 风电场无功功率

图 7 故障穿越控制下普通异步风电场的响应

Fig.7 Response of wind farm with conventional asynchronous generators under fault ride-through control

由上述仿真结果可知,升频法下风电场汇流母线电压波动较小,但普通异步风电机组的有功出力对频率变化的敏感程度高于电压变化,迅速下降的



风电场电磁功率可能导致风电场脱网。

### 2.3 故障穿越控制对双馈风电机组的影响

两种故障穿越方法下双馈风电机组的响应如图 8 所示。由图 8(a)和(b)可知,交流电网故障后采用升频法时转速  $W_{pu-F}$ (标么值)和有功功率  $P_{wf-U}$  恢复更慢,且波动幅度较小。同样,由图 8(c)和(d)

可知,采用升频法时,风电场汇流母线电压  $V_{wf-F}$ (标么值)波动较小,从电网吸收的无功功率  $Q_{wf-F}$  较少,与普通异步风电场特性相同。但图 8(e)和(f)表明,在降压法下双馈风电机组转子电流  $I_{r-U}$  水平较低,且变流器直流电压  $E_{cap-U}$  较为稳定,对变流器危害较小。

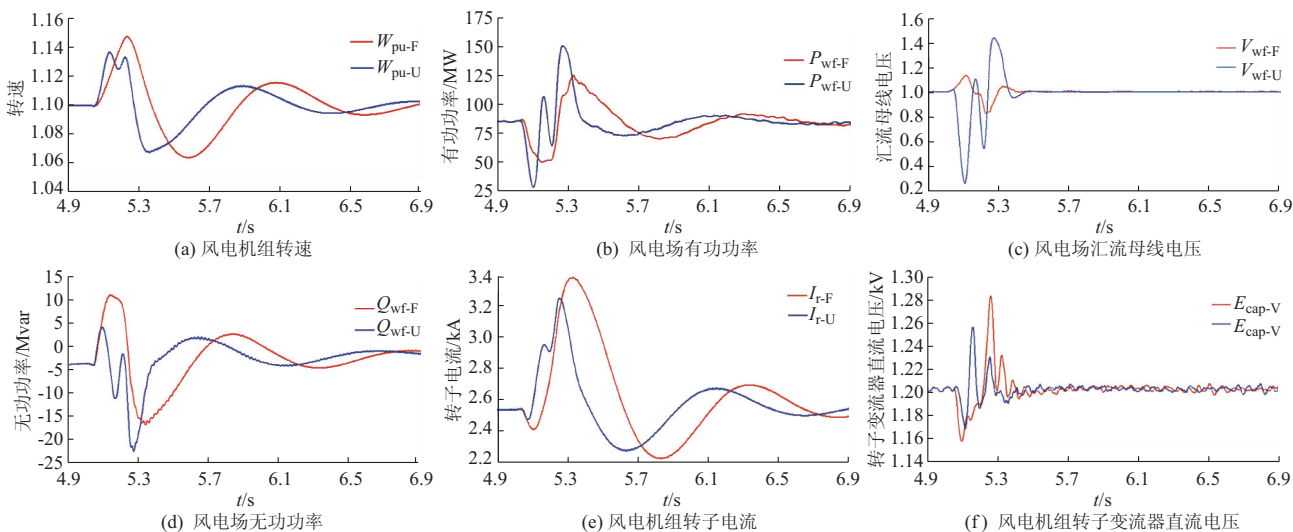


图 8 故障穿越控制下双馈风电场的响应

Fig.8 Response of DFIG-based wind farm under fault ride-through control

由上述仿真结果可知,双馈风电机组的动态性能较普通异步风电机组有所不同。前者与后者相同点为在升频法下的动态电压特性较好。不同点在于双馈风电机组对于频率变化的敏感程度较普通异步风电机组降低,这是转子的控制作用造成的。转子变流器虽然可以控制风电机组降低频率敏感度,但其本身对于频率变化较为敏感,在升频法下面临失效的危险,对风电机组的正常运行造成威胁。

### 2.4 故障穿越方法对风电机组的影响

不同的故障穿越控制方法会对各类风电机组的动态性能产生不同的影响。值得说明的是,下述总结的影响规律适用于普通异步风电机组和双馈风电机组,对于永磁直驱式风电机组的适用性有待验证。

升频法利用频率的改变来改变风电场的电磁功率。一方面,由于 WFVSC 所控制的电压、频率并不是完全解耦的,另外考虑到风电场和 WFVSC 之间的相互作用,使得在升频法下风电场汇流母线电压会产生波动,但波动较小,风电机组较易运行在低电压穿越(LVRT)所要求的安全电压范围之内。另一方面,升频法虽然使得风电场具有较好的动态电压特性,但若风电机组的电磁功率对交流电网的频率变化较为敏感,则频率的变化会使得风电场电磁功

率变化十分迅速,甚至可能造成风电场脱网的危险,例如普通异步风电机组。另外,尽管风电机组的电磁功率对交流电网的频率变化不敏感,但假如风电机组内部存在电力电子器件,则应考虑电力电子器件能否承受较大的频率变化,例如双馈风电机组。

降压法则是利用电压的改变来改变风电场的电磁功率。从风电场的角度考虑,降压法对风电场的影响与传统交流并网的风电场发生交流线路短路故障的特性一致。不同点在于在降压法中,由于电压跌落的幅值可以被 WFVSC 直接控制,因此可以保证风电机组运行在 LVRT 所规定的标准电压曲线之上。当直流系统功率过剩较多时,则需要较低的 LVRT 曲线,即较强的 LVRT 能力,才能保证故障穿越控制效果。

## 3 结语

本文介绍了为研究风电场 VSC-HVDC 系统的故障穿越问题而在 PSCAD/EMTDC 中建立的两端 VSC-HVDC 系统仿真模型,通过仿真得知当升频法和降压法对于直流系统的故障穿越效果大致相同时有如下结论。

1)对于普通异步风电机组,若风电机组 LVRT

能力较强,即能够应对风电场电压跌落幅值较大的情况,WFVSC应该采用降压法直接控制风电场电磁功率,降低风电机组因对频率变化敏感度高而造成的脱网危险;若风电机组LVRT能力较弱,为保证电压稳定性,WFVSC应采用升频法,并应事先确定风电机组所能承受的最大频率变化量。

2)对于双馈风电机组,当风电机组LVRT能力较强时,WFVSC可以采用降压法,减小采用升频法对双馈风电机组转子变流器的危害;当风电机组LVRT能力较弱时,为保证电压稳定性,WFVSC可采用升频法,同时加强对转子变流器的保护。

两种不同的故障穿越方法各有利弊,应当根据风电机组的运行工况和配置选择较为合适的故障穿越方法,在保证安全的前提下改善故障穿越控制效果。研究得出的结论可以为普通异步/双馈风电场VSC-HVDC系统进行仿真研究及选择故障穿越方法提供一定的参考依据。

## 参考文献

- [1] 陈鹤林,徐政,唐庚,等.海上风电场MMC-HVDC并网系统暂态行为分析[J].电力系统自动化,2014,38(12):112-118.  
CHEN Helin, XU Zheng, TANG Geng, et al. Transient behavior analysis of offshore wind farm integration system with MMC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 112-118.
- [2] 黄川,王志新,王国强.基于MMC的海上风电场柔性直流输电变流器仿真[J].电力自动化设备,2011,31(11):23-27.  
HUANG Chuan, WANG Zhixin, WANG Guoqiang. Simulation of MMC-based converter for flexible direct current transmission of offshore wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 23-27.
- [3] 洪芦诚,魏应冬,姜齐荣,等.基于动态电压调节器的风电机组低电压穿越策略[J].电力系统自动化,2011,35(16):32-37.  
HONG Lucheng, WEI Yingdong, JIANG Qirong, et al. Low voltage ride through strategy for wind turbine systems using dynamic voltage restorers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 32-37.
- [4] DITTRICH A, STOEV A. Comparison of fault ride-through strategies for wind turbines with DFIM generators[C]// 11th European Conference on Power Electronics and Applications, September 11-14, 2005, Dresden, Germany: 8p.
- [5] ARULAMPALAM A, RAMTHARAN G, EKANAYAKE J B, et al. Fault ride through operation of a DFIG wind farm connected through VSC HVDC[C]// International Conference on Industrial and Information Systems (ICIS), July 29-August 1, 2010, Mangalore, India: 520-525.
- [6] EGEA-ALVAREZ A, JUNYENT-FERRE A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Operation and control of VSC-HVDC multiterminal grids for offshore wind[C]// 14th Conference on Power Electronics and Applications, August 30-September 1, 2011, Birmingham, UK: 9p.
- [7] LIANG Jun, GOMIS-BELLMUNT O, EKANAYAKE J, et al. Control of multi-terminal VSC-HVDC transmission for offshore wind power [C]// 13th European Conference on Power Electronics and Applications, September 8-10, 2009, Barcelona, Spain: 10p.
- [8] FELTES C, WREDE H, KOCH F W, et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3): 1537-1546.
- [9] VRIONIS T D, KOUTIVA X I, VOVOS N A, et al. Control of an HVDC link connecting a wind farm to the grid for fault ride-through enhancement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 2039-2047.
- [10] 廖绍谦,杨金明.风电场故障穿越能力研究[J].云南电力技术,2010,39(5):15-17.
- [11] 郑超,马世英,宋云亭,等.一种大型风电场电磁暂态仿真的等效聚合模拟方法:中国,CN102024079A[P].2011-04-20.
- [12] 徐海亮,章玮,贺益康,等.双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J].电力系统自动化,2013,37(20):8-15.  
XU Hailiang, ZHANG Wei, HE Yikang, et al. A review on low voltage ride-through technologies and prospect for DFIG wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 8-15.
- [13] 雷虹云,郑超,汪宁渤,等.基于变频器受控源模拟的双馈风机等效仿真[J].中国电力,2012,45(6):82-86.  
LEI Hongyun, ZHENG Chao, WANG Ningbo, et al. Equivalent simulation of doubly-fed induction generators based on controlled source models of converters [J]. Electric Power, 2012, 45(6): 82-86.
- [14] van der MEER A A, HENDRIKS R L, KLING W L. Combined stability and electro-magnetic transients simulation of offshore wind power connected through multi-terminal VSC-HVDC [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA: 7p.
- [15] GOMIS-BELLMUNT O, EGEA-ALVAREZ A, JUNYENT-FERRE A, et al. Multiterminal HVDC-VSC for offshore wind power integration [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, USA: 6p.

厉璇(1989—),女,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:直流输电工程二次系统设计仿真试验。E-mail: lixuan@chinasperi.sgcc.com.cn

宋强(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向:柔性输电技术和大功率电力电子技术。E-mail: songqiang@tsinghua.edu.cn

刘文华(1968—),男,博士,教授,主要研究方向:柔性输电技术和大功率电力电子技术。E-mail: liuwenh@tsinghua.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

(下转第125页 continued on page 125)

## Impact of Fault Ride-through Methods on Wind Power Generators in a VSC-HVDC System

*LI Xuan<sup>1</sup>, SONG Qiang<sup>2</sup>, LIU Wenhua<sup>2</sup>, MA Yulong<sup>1</sup>*

(1. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, 100084, China)

**Abstract:** Voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) system is a relatively good choice for the grid integration of large-scale wind farms. When faults occur in the AC grid, the fault ride-through (FRT) controller of wind power generators can maintain the stability of the system. However, the controller will have impact on the wind power generators performance. To study on the FRT problem for wind power generators in a VSC-HVDC system, this paper develops a simulation model of the two-terminal VSC-HVDC system including detailed models of wind farms with conventional asynchronous generators and doubly-fed induction generators (DFIGs) using PSCAD/EMTDC. Two typical FRT methods, i. e., frequency increase method and voltage reduction method are verified. Furthermore, the characteristics of different wind power generators with different FRT methods are studied. The typical impact of FRT methods on the wind power generators in a VSC-HVDC system is obtained. The conclusions can provide a reliable reference for choosing appropriate FRT methods for different wind power generators integrated into a VSC-HVDC system.

**Key words:** wind power generation; large-scale wind farm; voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC); fault ride-through (FRT); low voltage ride-through (LVRT)