LVRT用于控制VSC－HVDC并网系统的双馈风电场

目前风电大规模外送是通过柔性高压直流输电系统（VSC－HVDC）完成的。分析了并网点交流侧出现的故障，由于VSC－HVDC输出功率能力下降，从而出现直流侧功率过剩、电压上升等问题。由此，提出一种维持功率平衡并实现风电场低电压穿越（LVRT）的策略。该策略通过在直流侧加装减载装置，并消耗VSC－HVDC两端不平衡引起的“功率差”能量，使风电机组稳定运行。结合某风场进行仿真分析，仿真结果验证了该策略的有效性。

张　亮　王　刚　张　柳　赵　毅　孙文瑶/沈阳工程学院电力学院

张　亮/助理工程师

关键词/Keywords
双馈风力发电场·
柔性直流输电·
减载·
低电压穿越·

近年来，风力发电发展迅速，“输电瓶颈”问题也日趋严重。VSC－HVDC系统是新型输电系统，风力发电机组经过VSC－HVDC系统能够将风电大规模外送，同时具有良好的电压调节功能、向偏远地方孤立负荷供电、独立地控制有功功率和无功功率、向系统提供一定的无功功率支持以及提高电能质量等优势。

为了提高电力系统可靠性，在输电过程中要重视风机低电压的问题，对风机的低电压穿越[1]有明确的要求[2]。故障或扰动给高压直流输电带来了挑战，风机通过VSC－HVDC系统并网，VSC－HVDC隔离了风机和电网，具有可靠性高、电能质量好的特点。对于风电场经VSC－HVDC并网系统的LVRT控制关键是维持传输功率的平衡。

双馈型风力发电机具有技术成熟、电力电子变流装置所需要的容量小等优点[3]，广泛应用于我国各大风电场中，因此将双馈型风力发电机作为首选应用到VSC－HVDC中。传统的双馈型风力发电机LVRT主要是从控制策略和外加电路上进行控制，文献[4]提出撬棒保护的低电压穿越控制策略，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，以保护转子侧变流器。

本文介绍了双馈风力发电机经VSC－HVDC并网系统的LVRT控制，采取直流侧加装减载装置，抑制输电系统直流母线电压过高、消耗功率不平衡引起能量过剩方法，对风力发电机组不造成影响，不脱网继续出力，实现低电压穿越。

双馈型风力发电机数学模型和风电机组等效方法

1. 双馈型风力发电机的数学模型

双馈风力发电机的电压和电流参考方向按电动机惯例选取，d轴与定子电压矢量方向一致，即$u_{gq}=0$。其磁链方程标幺值形式以及暂态电压方程[5-9]为

$$\begin{cases} \boldsymbol{u}_{\mathrm{w}} = R_{\mathrm{s}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}} + \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t} + \mathrm{j}\omega_{\mathrm{w}}\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{g}} \\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{r}} = R_{\mathrm{r}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} + \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t} + \mathrm{j}(\omega_{\mathrm{w}} - \omega_{\mathrm{r}})\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{r}} \\ \boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{r}} = L_{\mathrm{r}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} + L_{\mathrm{m}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}} \\ \boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{g}} = L_{\mathrm{s}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}} + L_{\mathrm{m}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}} \\ L_{\mathrm{s}} = L_{\mathrm{s}\sigma} + L_{\mathrm{m}} \\ L_{\mathrm{r}} = L_{\mathrm{r}\sigma} + L_{\mathrm{m}} \end{cases} \quad (1)$$

式中，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{w}}$、$\boldsymbol{u}_{\mathrm{r}}$分别为定子和转子电压空间矢量；$\boldsymbol{i}_{\mathrm{g}}$、$\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}}$分别为定子和转子电流空间矢量；$\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{w}}$、$\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{r}}$分别为定子和转子磁链矢量；$R_{\mathrm{s}}$、$R_{\mathrm{r}}$分别为定子电阻和转子电阻；$L_{\mathrm{s}\sigma}$、$L_{\mathrm{r}\sigma}$分别为定子漏感和转子漏感；

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

L_s、L_r分别为定子电感和转子电感；ω_r为转子电角频率；ω_w为风场电压电角频率。

2. 双馈型风力发电机组等效方法

将双馈型风场等效为一台双馈型风力发电机，留取全部的风力机和风速模型[10]，累加双馈型风力发电机的机械转矩为T_{sum}，将等效后的发电机作为输入，其表达式为

$$\begin{cases} S_{eq}=\sum_{i=1}^{m}S_i \quad P_{eq}=\sum_{i=1}^{m}P_i \quad C_{eq}=\sum_{i=-1}^{m}C_i \\ Z_{G-eq}=\dfrac{Z_G}{m} \quad Z_{T-eq}=\dfrac{Z_T}{m} \quad T_{sum}=\sum_{i=1}^{m}T_i \end{cases} \tag{2}$$

式中，eq为双馈型风力发电机等效后；m为风力发电机台数；S为容量大小；P为有功功率；C为补偿电容；Z_G、Z_T分别为风力发电机阻抗和机端变压器阻抗。

VSC－HVDC数学模型与控制系统

VSC－HVDC是并网风电场结构的核心部分，分析了VSC－HVDC的结构与数学模型，它与减载装置各个参量设置密不可分。

1. VSC－HVDC数学模型

两个电压源型换流器结构是相同的，分析其一端系统，VSC－HVDC一侧换流站单线图如图1所示。

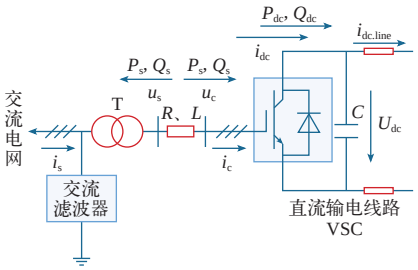


图1 VSC－HVDC 一侧换流站单线图

在损耗不计的情况下，有

$$P_s=P_{dc} \tag{3}$$

VSC－HVDC变流站在abc三相静止坐标系下的数学模型[11]为

$$C\frac{dU_{dc}}{dt}=\begin{pmatrix} \lambda M\cos(\omega t+\delta) \\ \lambda M\cos(\omega t-120^\circ+\delta) \\ \lambda M\cos(\omega t+120^\circ+\delta) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}-i_{dc.line} \tag{4}$$

进一步将式（4）变换到dq同步旋转坐标系得

$$C\frac{dU_{dc}}{dt}=\frac{3\lambda M}{2}(i_d\cos\delta+i_q\sin\delta)-i_{dc.line} \tag{5}$$

式中，λ为定值，与PWM调制方式有关；δ为VSC交流侧输出电压和系统交流电压之间的夹角；M为调制比；dc为直流侧参量。

2. VSC－HVDC控制系统

VSC－HVDC控制系统可以控制有功功率，前提是要保持两端的有功平衡，如果有功功率发生的变化大，直接影响着直流侧电压的变化。因此，整流侧与逆变侧之间的影响表现在有功功率发生的变化上。整流端有功功率控制的参量为δ_1；逆变侧直流电压控制的参量为δ_2；整流端无功功率控制参量为M_1；逆变侧交流电压控制参量为M_2。

VSC－HVDC连接输电系统的整流侧、逆变侧控制框图如图2、图3所示。

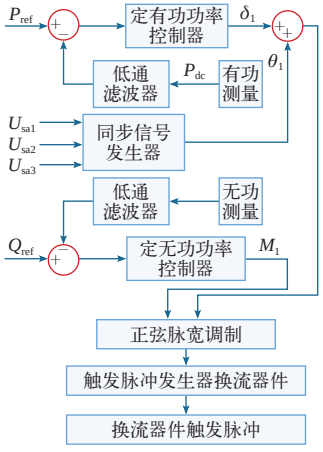


图2 VSC－HVDC连接输电系统的整流侧控制框图

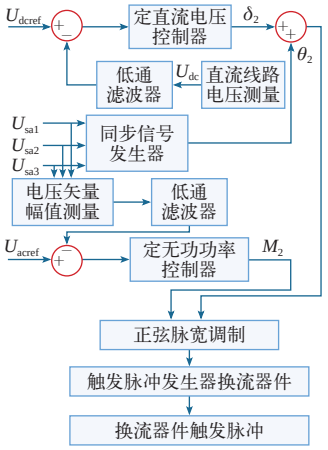


图3 VSC－HVDC连接输电系统的逆变侧控制框图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基于VSC－HVDC并网故障穿越方法的研究

交流电网发生故障后，故障点电压跌落，双馈风电场经过VSC－HVDC并网的低电压穿越控制，主要消除VSC－HVDC直流侧多余的功率能量，保持传输功率平衡。

VSC－HVDC并网输电系统是新型高压直流输电系统，输电线路消耗的有功较小，可忽略。当交流系统出现故障后，引起功率不平衡，功率差值ΔP表达式为

$$\Delta P=\left|\frac{3}{2}u_{sd}i_d-u_{dc}i_{dc}\right|=u_{dc}C\frac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

从式（6）可知，当功率不平衡时，$\Delta P\neq 0$，即直流电压的变化率也不为零，因此VSC－HVDC的直流电压变动可以作为系统功率不平衡的标志。

采取直流减载电阻，经过全控型电子阀门接于电网侧直流线路，其控制电路如图4所示。

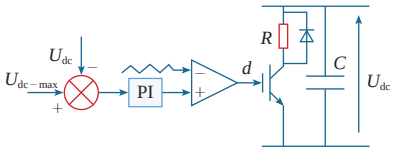
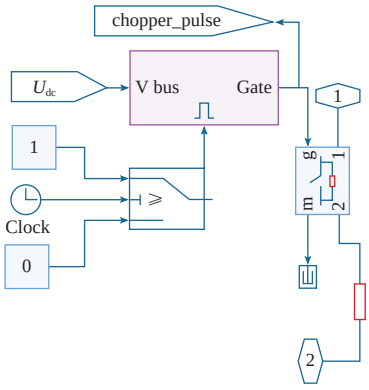


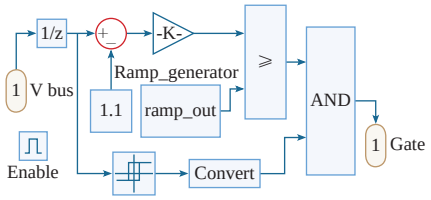
图4　基于减载电阻故障穿越控制电路

当系统正常工作时，保护电路不起作用；当电网交流侧发生故障时，电压跌落，直流侧的输入功率大于输出功率，直流侧电压会发生变化，此时触发减载装置会消耗多余的能量，同时能够抑制直流侧的电压，保护输电系统。

减载部分的逻辑控制框图如图5a、b所示。



（a）减载部分逻辑控制



（b）直流侧电压与触发信号逻辑控制

图5　减载部分逻辑控制框图

选取减载电阻的大小，主要与直流侧允许的最大电压及所需要消耗的最大功率有关。忽略电路中非线性元件时，有

$$R=\frac{U_{dc-max}^2}{\Delta P_{max}} \tag{7}$$

式中，U_{dc-max}为直流母线所允许的电压上限；ΔP_{max}为消耗的最大功率。

电路投入的占空比为

$$d=\frac{C_{dc}(U_{dc}-U_{dc-max})}{U_{dc-max}R} \tag{8}$$

$$\begin{cases}U_{dc}>U_{dc-max} & \text{触发}\\ U_{dc}\leqslant U_{dc-max} & \text{不触发}\end{cases} \tag{9}$$

双馈风力发电场经过VSC－HVDC并网系统的LVRT控制后，关键检测直流侧电压变化，当直流侧电压超过最大允许值时，减载装置即刻投入；当直流侧电压低于最大允许值时，减载装置切除。

仿真分析

提出的VSC－HVDC双馈型风电场LVRT控制，主要用于大型风电场的输电外送以及偏远地方风电远距离的输送。

为了验证本文提出的双馈风力发电场经VSC－HVDC并网系统的LVRT控制及直流侧加装减载装置消耗过剩能量的有效性，在Matlab/Simulink中建立了基于VSC－HVDC双馈型风电场低电压穿越装置的仿真模型。

以某双馈型风力发电厂接入无穷大系统为例，参考丹麦某示范工程实际运行参数，其结构示意图如图6所示。

风力发电厂是由3个子等效风场组成，3个子等效风场是相同的，每个子风场由20台1.5 MW和10台1 MW双馈风力发电机等效组成，等效参数如

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下表所示。

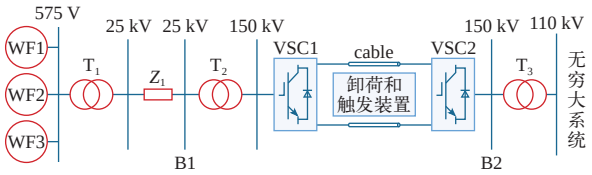


图6 算例结构示意图

表 等效风电机组参数

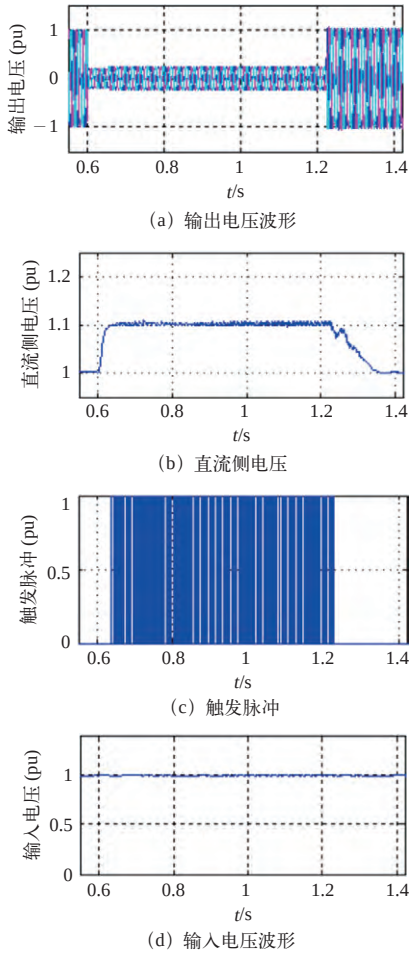
参数	单台参数		等效风电
	20台	10台	机组参数
额定功率/MW	1.5	1	40
额定电压/V	575	575	575
频率/Hz	50	50	50
惯性常数/s	5.04	3.5	4.116
阻尼系数（pu）	0.01	0.01	0.01
定子电阻（pu）	0.007 06	0.004 88	0.020 6
定子电抗（pu）	0.171	0.138 6	0.198 2
转子电阻（pu）	0.005	0.005 49	0.005 3
转子电抗（pu）	0.156	0.149 3	0.152 0
激励电抗（pu）	2.9	3.952 7	3.501 5
初始滑差	0.2	0.2	0.2

风场出口电压为575 V；经过变压器T_1后变为25 kV，再经过1 km传输到B1处；经过变压器T_2后变为150 kV，直流侧cable长度为180 km，到达B2处；最后经过变压器变为110 kV，接入无穷大系统。

系统故障设置在B2处，故障时间为0.6 s，故障持续625 ms后在1.225 s时切除故障，风速设定为恒速15 m/s，各个参数的波形如图7、图8所示。

1. 系统故障电压分析

在图7a中，当故障在0.6 s时，输出端在B2处，输出电压发生跌落，且跌落至额定电压的20%处；当1.225 s处故障切除时，输出电压恢复。从图7b、c中可知，当发生故障时，直流电压开始上升，触发脉冲没有置“1”；当直流侧电压上升至直流母线所允许的电压上限时，触发脉冲置“1”；当故障切除时，直流侧电压开始降低，触发脉冲即刻置“0”。从图7d可知，双馈风电场输出电压保持恒定，说明风电机组在故障期间没有脱网运行，能够恒定输出。从仿真结果可知，仿真结果与理论分析一致。



（a）输出电压波形

（b）直流侧电压

（c）触发脉冲

（d）输入电压波形

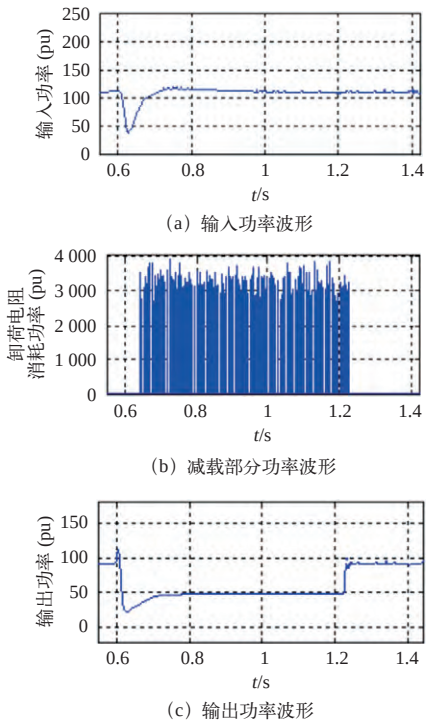
图7 输出电压、直流侧电压、触发脉冲及输入电压波形

2. 系统故障功率分析

由图8a可知，故障发生后由于系统较大而且复杂，故障投入和切出瞬间会受到一定波动影响，但是输出电压基本保持不变；输出功率在故障期间减少，减载电阻投入工作。由图8b可知，输出功率在故障前后有大约38 MW的功率差，这将使输入和输出功率之差增大，这部分功率差转移到高压直流输电线路上，高压直流输电线路上大约有38 MW的功率堆积。从图8c可知，故障期间输电系统不可避免地出现线路损耗，减载电阻上功率与输出端下降的功率近似相等。减载电阻有效地消耗掉高压直流侧堆积功率，保护了输电系统和运行设备。

由图7和图8整体分析可知：图7c和图8b中，触发脉冲与减载部分同步进行。在故障发生和结束时，系统出现轻微冲击，且都是在系统允许范

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）输入功率波形

（b）减载部分功率波形

（c）输出功率波形

图8　输入功率、减载荷电阻的功率和输出功率波形

围内，当故障625 ms结束后，系统恢复故障之前状态，说明此方法满足低电压穿越要求。

结束语

介绍了双馈风力发电场经VSC－HVDC并网系统的LVRT控制，在Matlab/Simulink下建立了含双馈型风电场低电压穿越模型，研究了减载电阻装置对能量消耗的有效性，并得出如下结论：

通过加装减载装置维持了传输功率的平衡，实现了VSC－HVDC风机系统的LVRT控制，验证了该方法的有效性；在电网侧出现故障期间，双馈型风电场继续输出有功且保持不变，减载装置有效地消耗掉系统过剩功率。VSC－HVDC输电系统有效地隔离风力机组和电网，减小了电网因故障对风力机组的冲击；新型VSC－HVDC风机系统的LVRT研究尚处于刚刚起步阶段，减载装置比加装储能装置经济，且具有在故障瞬间减少风机组出力快速有效等优势。

参考文献

[1] 贺益康，周鹏．变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述 [J]．电工技术学报，2009，24 (9)：140-146．

[2] 王定国，张红超．双馈型风力发电机低电压穿越的分析研究 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (17)：70-73．

[3] 吴杰，孙伟，颜秉超．应用STATCOM提高风电场低电压穿越能力 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (26)：1-6．

[4] 吕志强，许国东．兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (23)：112-116，125．

[5] 李建林，高志刚，胡书举．并联背靠背PWM变流器在直驱型风力发电系统的应用 [J]．电力系统自动化，2008，32 (5)：59-61．

[6] 张坤，毛承雄，陆继明，等．基于储能的直驱风力发电系统的功率控制 [J]．电工技术学报，2011，26 (7)：7-14，43．

[7] 王文亮，葛宝明，毕大强．储能型直驱永磁同步风力发电控制系统 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (14)：43-48，78．

[8] 刘其辉，谢孟丽．双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略 [J]．电工技术学报，2012，27 (10)：60-67，78．

[9] 包能胜，徐军平，倪维斗，等．大型风电场失速型机组等值建模的研究 [J]．太阳能学报，2007，28 (11)：1284-1289．

[10] 曹娜，赵海翔，任普春，等．风电场动态分析中风速模型的建立及应用 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (36)：68-72．

[11] 迟永宁，王伟胜，戴慧珠．改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (25)：25-31．

（收稿日期：2015－03－15）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net