

# 三相电压源型换流器故障耐受能力分析 & 评估

彭宇<sup>1</sup>, 黄萌<sup>1</sup>, 查晓明<sup>1</sup>, Chi K. TSE<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072; 2. 香港理工大学电子与资讯工程系, 香港)

**摘要:** 三相电压源型并网换流器由于含有大量电力电子开关器件及相应控制环节, 是一种强非线性系统。在交直流混合系统中受到电网侧故障或直流侧负载变化等扰动影响, 大容量换流器将产生复杂的响应行为, 给电网带来难以预计的影响。文中考虑电网中三相电压暂降的典型故障, 基于平均模型分析了三相电压源型换流器电流环的非线性特性。在此基础上, 根据李雅普诺夫稳定性判据分析了故障前后换流器的稳定性, 并以故障深度和故障持续时间为指标对换流器故障耐受能力进行评估。最后, 通过并网系统的逐周期仿真验证了理论分析和计算的有效性。

**关键词:** 并网换流器; 非线性分析; 李雅普诺夫稳定性; 故障耐受能力

## 0 引言

近年来, 新能源发电、微网、高压直流(HVDC)输电等交直流混合系统受到了广泛关注。在这些交直流混合系统中, 通常需要电力电子换流器作为功率交换接口, 起到稳定直流母线电压, 降低交流电流谐波含量的作用<sup>[1-3]</sup>。其中, 三相电压源型换流器(VSC)具有稳定性高、功率因数可控等优点, 因而被广泛应用。

相较于传统的旋转电机, 并网换流器对电网故障的响应大为不同。三相VSC中含有对电流处理能力较弱的半导体开关, 因而需要引入附加控制来保证设备正常运行<sup>[4]</sup>。换流器控制环节的多样性及交直流混合系统中故障的多样性造成系统故障响应的复杂性。因此, 三相VSC对故障的反应多种多样, 且与电网结构、故障类型及位置密切相关。同时, 由于正弦脉宽调制(SPWM)及控制环路引入的非线性, 导致换流器容易进入非正常工作状态<sup>[5]</sup>。然而, 电网对接口换流器的运行要求十分严格, 例如风力发电系统中的VSC面对不同的电压跌落等级, 均需保证一段时间不脱网。故而, 有必要研究分析不同电网故障下的VSC响应行为。

与换流器自身引起的稳定性问题相关的研究十分广泛, 如LCL滤波器<sup>[6-9]</sup>、锁相环<sup>[10-12]</sup>等模块的性

能对系统的稳定性影响, 并网换流器中的谐波及谐振现象<sup>[13-14]</sup>, 以及相继提出的有源阻尼控制<sup>[15-17]</sup>、并网电流鲁棒控制<sup>[18]</sup>、电流谐波消除策略<sup>[19]</sup>等。考虑到非理想电网情况, 文献[20-21]主要基于阻抗比判据分析了交互作用对系统稳定性的影响。但是, 以上研究均采用小信号建模, 在系统稳态点附近进行分析, 并未考虑到电网受到故障冲击时稳态点发生改变后系统的稳定性问题。

针对三相VSC在受扰情况下的运行问题, 有文献对换流器受扰后的控制策略进行了研究。如考虑网侧电压出现畸变及不平衡情况, 采用大信号方法建立控制环路数学模型, 实现了指令电流精确控制<sup>[22]</sup>; 考虑电网电压不平衡情况, 提出了脉宽调制(PWM)整流器功率谐振补偿控制策略<sup>[23]</sup>; 针对故障后引入三相电压的直流分量, 研究了同步坐标锁相环中消除了直流分量影响的控制策略<sup>[24]</sup>; 针对三相不平衡故障, 提出了三相VSC的功率改进控制方法<sup>[25]</sup>。以上研究虽对电网故障后换流器运行提出了改进措施, 但未对故障下换流器的响应行为进行全面系统的分析。

本文基于典型微网结构模型, 将其他负载及电源等效为恒定功率负载, 重点研究微网中三相VSC耐受电网故障冲击的能力。首先, 分析了交流侧故障时VSC的不稳定瞬态响应现象; 然后, 应用平均模型及李雅普诺夫稳定性分析法, 揭示了换流器受扰失稳原因, 并给出了换流器能够耐受电网故障冲击关键参数的范围; 最后, 通过系统逐周期仿真验证了理论计算的准确性。

收稿日期: 2016-01-28; 修回日期: 2016-04-01。

上网日期: 2016-07-18。

国家自然科学基金资助项目(51507118); 湖北省科技支撑计划资助项目(2015BAA109); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(410500078)。

### 1 三相 VSC 故障响应

典型微网结构如图 1 所示。微网系统中存在 3 种典型的故障,即故障 1 所代表的公共电网电压暂降,故障 2 所代表的传输线路故障以及故障 3 代

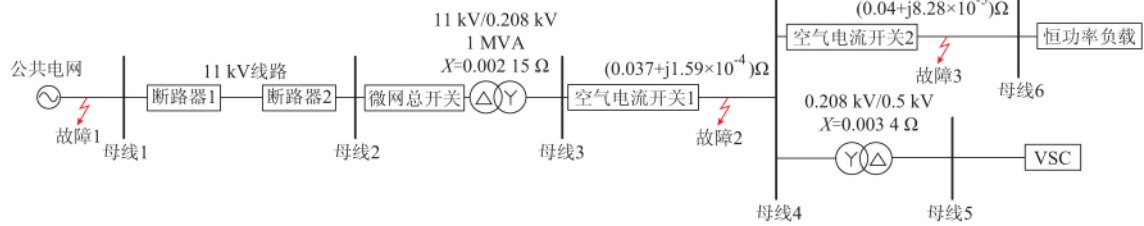


图 1 含三相 VSC 的微网系统  
Fig. 1 Microgrid with three-phase VSC

电网对故障状态下的换流器有并网要求,即要保证换流器在规定时间内不脱网运行。例如在风力发电系统中规定了换流器并网准则,针对不同电压跌落深度(10%~100%),换流器需要保持数百至数千毫秒的不脱网运行。

本文建立了图 1 所示的微网模型,其中三相 VSC 的电路参数和控制参数如下:额定功率为 100 kW,直流母线电压为 1 200 V,开关频率为 10 kHz,滤波电感为 2 mH,直流母线电容为 2.35 mF;  $k_{vp} = 3$ ,  $k_{vi}$ ,  $k_i$ ,  $k_{ii} = 20$ 。采用典型的三相 VSC 电路拓扑及其电压电流双环控制框图如图 2(a)和(b)所示,其中  $g_v$  和  $g_i$  分别为电压和电流控制函数,本文主要针对故障 1 处的三相电压暂降故障予以分析。

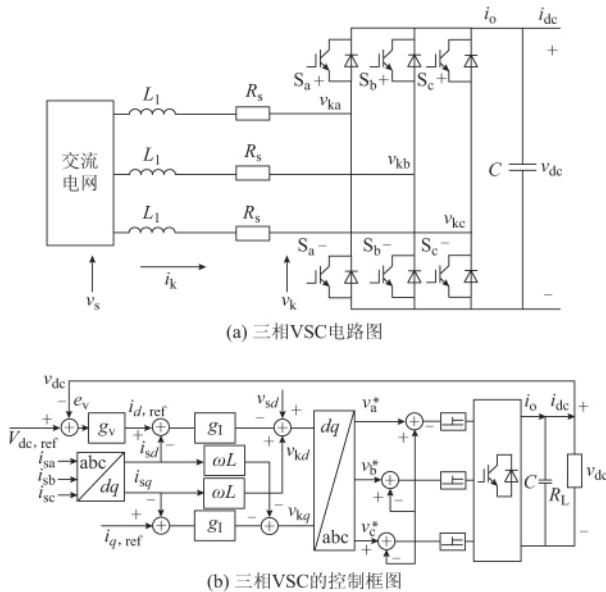


图 2 三相 VSC 电路和控制框图  
Fig. 2 Circuit and control diagram of three-phase VSC

表的分布式电源或其他设备上的故障,而这些点的故障又包含单相接地故障、两相接地故障、三相接地故障及相间故障。

在 MATLAB/Simulink 中建立仿真模型,  $t = 0.5$  s 时,故障 1 处发生瞬态三相接地故障,网侧电压跌落至正常运行状况下的 60%,故障持续时间 50 ms,仿真结果如图 3 所示。可以观察到故障发生时,直流侧电压大幅跌落,交流侧电流突增到 800 A 左右。系统不再保持单位功率因数运行,从交流系统吸收大量无功功率。由仿真可知,系统在故障后经历灾难性分岔<sup>[5]</sup>的非线性行为且进入了非正常运行模式。同时可以发现,如果没有额外控制环节,系统无法自动回到稳定运行状态。换流器无法承受该种程度的故障。

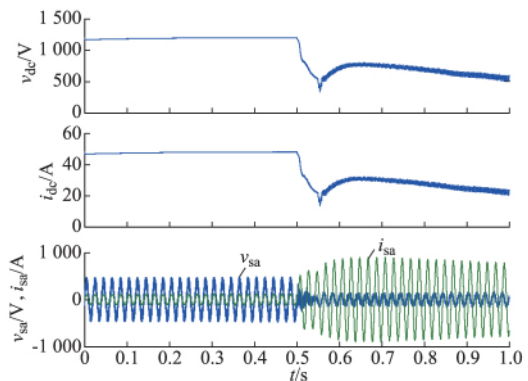


图 3 三相 VSC 瞬态响应波形  
Fig. 3 Transient response waveforms of three-phase VSC

### 2 系统稳定性分析

本节在合理进行系统降阶基础上,基于李雅普诺夫稳定性判据,得出系统失稳条件,再对系统故障后的时域响应进行分析。

采用开关平均模型,根据同步旋转坐标函数,将 VSC 转化到 dq 旋转坐标系下,其方程如下:

$$L \frac{di_d}{dt} = \omega_1 L i_q + v_{sd} - R_s i_d - v_{kd} \quad (1)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -\omega_1 L i_d + v_{sq} - R_s i_q - v_{kq} \quad (2)$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_o - i_{dc} \quad (3)$$

式中:  $\omega_1 = 2\pi f_1$  为电网频率的角频率;  $v_{sd}$  和  $v_{sq}$  分别为  $dq$  坐标系下换流器并网点处电压;  $v_{kd}$  和  $v_{kq}$  分别为  $dq$  坐标系下换流器桥臂中点电压。

深度过调制状态下的内环电流  $i_d$  和  $i_q$  将由文献 [5] 中的方程  $i_d = h_d(i_{d,ref})$  及  $i_q = h_q(i_{d,ref})$  给出, 可以得到内环电流的表达式如下:

$$f_d(i_{d,ref}) = \begin{cases} i_{d,ref} & i_{d,ref} \leq i_{d,critical} \\ h_d(i_{d,ref}) & i_{d,ref} > i_{d,critical} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_q(i_{d,ref}) = \begin{cases} 0 & i_{d,ref} \leq i_{d,critical} \\ h_q(i_{d,ref}) & i_{d,ref} > i_{d,critical} \end{cases} \quad (5)$$

可以看出, 实际内环电流是一个分段连续函数。在电流指令较小时, 实际电流可以跟随指令电流; 在电流指令较大时, 实际电流无法跟随指令电流, 而呈现复杂的函数关系, 这也将引起控制器的失稳。

由功率平衡方程可以得出稳态下的电流转移方程。在此, 系统损耗等效为电感串联电阻上的损耗:

$$P_{load} = P_{input} - P_{loss} \quad (6)$$

$$i_o = \frac{3[v_{sd}i_d + v_{sq}i_q - R_s(i_d^2 + i_q^2)]}{2v_{dc}} \quad (7)$$

根据式 (4)、式 (5) 及式 (7) 可以得到不同电压跌落深度下所对应的输出电流  $i_o$  与参考电流  $i_{d,ref}$  传输方程, 该方程也表现出分段连续性: 输出电流  $i_o$  首先随参考电流  $i_{d,ref}$  的增大而线性增大, 在达到电流临界值后, 电流传输特性进入非线性区域。电网电压跌落一方面影响了临界电流  $i_{d,critical}$  的大小, 可判断系统稳定与否; 另一方面在不同电网电压跌落深度时换流器瞬态响应有所不同 [26]。

在研究线性定常系统时, 已有许多判据如代数稳定判据、奈奎斯特稳定判据等可用来判定系统的稳定性。李雅普诺夫稳定性理论能同时适用于分析线性系统和非线性系统、定常系统和时变系统的稳定性, 是更为一般的稳定性分析方法。通常根据系统的复杂程度可将李雅普诺夫稳定性分析方法分为第一法与第二法。对于阶数较低的非线性系统, 采用第二法不容易寻找其标量  $V$  函数, 故而常常采用第一法, 通过构建系统状态方程, 求解平衡点处的雅可比矩阵, 并根据线性化后的特征根对系统稳定性进行判定。

随着参考电流  $i_{d,ref}$  的增加, 输出电流  $i_o$  具有非线性运行特性, 且电压外环阶数较低。因此, 可采用李雅普诺夫分析方法第一法, 利用特征根轨迹对系统稳定性进行判断。

根据图 2(b) 所示的控制框图, 可知电流参考值由以下方程给出:

$$i_{d,ref} = g_v(e_v) \quad (8)$$

$$e_v = V_{dc,ref} - v_{dc} \quad (9)$$

$$g_v(e_v) = k_p e_v + k_i \int e_v dt \quad (10)$$

式中:  $k_p$  和  $k_i$  分别为比例和积分系数。

令

$$\frac{dx_1}{dt} = e_v = V_{dc,ref} - v_{dc} \quad (11)$$

有

$$\frac{de_v}{dt} = -\frac{dv_{dc}}{dt} \quad (12)$$

根据式 (3) 和式 (7) 所示方程可以将电压环状态方程整理为:

$$\dot{x} = f(x, \mu) \quad (13)$$

其中  $x^T = [e_v, x_1]$ ,  $\mu^T = [V_{dc,ref}, v_{sd}, v_{sq}]$ , 状态方程如下:

$$\begin{cases} f_1(e_v) = \frac{de_v}{dt} = -\frac{3[v_{sd}i_d + v_{sq}i_q - R_s(i_d^2 + i_q^2)]}{2Cv_{dc}} + \frac{i_{dc}}{C} \\ f_2(x_1) = \frac{dx_1}{dt} = V_{dc,ref} - v_{dc} \end{cases} \quad (14)$$

其静态工作点为:

$$X_Q = \begin{cases} e_v = 0 \\ x_1 = \frac{I_{d,ref}}{k_{vi}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $I_{d,ref}$  为  $i_{d,ref}$  的幅值;  $k_{vi}$  为电压环积分系数。

平衡点附近的雅可比矩阵即为:

$$A = J(Q) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=X_Q} = \begin{bmatrix} -\frac{3k_{vp}(v_{sd} - 2R_s I_{d,ref})}{2CV_{dc,ref}} & -\frac{3k_{vi}(v_{sd} - 2R_s I_{d,ref})}{2CV_{dc,ref}} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $k_{vp}$  为电压环比例系数。

系统的特征根可以根据方程求出, 则有

$$\lambda^2 + \frac{3k_{vp}(v_{sd} - 2R_s I_{d,ref})}{2CV_{dc,ref}} \lambda + \frac{3k_{vi}(v_{sd} - 2R_s I_{d,ref})}{2CV_{dc,ref}} = 0 \quad (17)$$

由此, 可以得出外环电压特征方程的根轨迹图 (见图 4), 且不同电压跌落深度有着相同的根轨迹趋势。如图 4 所示, 根轨迹在原点处分裂为两个相反方向的实根, 右半平面的实根显示外环电压在此

条件下不能稳定工作。

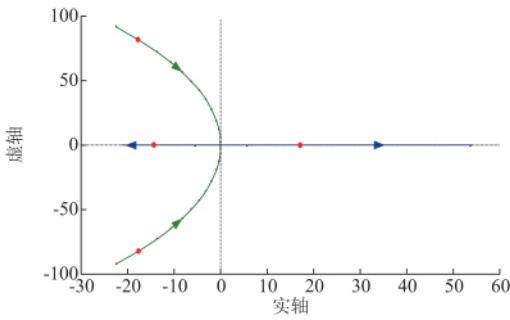


图4 外环电压特征方程根轨迹图  
Fig. 4 Root locus of characteristic equation of outer voltage loop

当换流器经历灾难性分岔,其静态工作点发生改变。在经历灾难性分岔前,即  $i_{d,ref} < i_{d,critical}$  时,特征方程能满足条件  $Re|\lambda| < 0$ ,系统稳定运行;而经历灾难性分岔后,即  $i_{d,ref} > i_{d,critical}$  时,系统出现右半平面实根,系统失稳。因此,当经历灾难性分岔后,系统将从稳定运行转变为不稳定运行。

当故障1点出现三相接地故障时,并网侧电压  $v_{sd}$  在随网侧电压成比例跌落后会继续降低至极小值,其具体过程如下。

1)  $v_{sd}$  随网侧电压跌落,造成输入侧功率不足,根据式(6)所示功率平衡方程,直流侧电压  $v_{dc}$  随  $v_{sd}$  的降低而降低。

2) 参考电流  $i_{d,ref}$  与直流电压  $v_{dc}$  成反比,其关系式可由式(8)所示电压外环控制方程反映,故而  $i_{d,ref}$  幅值增大。

3) 由图2(b)所示的控制框图可以得到控制信号方程:

$$v_d^* = \omega L i_q + v_{sd} - g_1 (i_{d,ref} - i_d) \quad (18)$$

上述方程显示  $v_{sd}$  降低后,  $i_{d,ref}$  的减小进一步降低了控制电压的幅值  $v_d^*$  减小。

4) 线性调节时,控制电压即为换流器桥臂中点电压:  $v_{kd} = v_d^* \mu_{kd}$  减小。

5) 根据换流器模型方程:

$$v_{kd} = \omega L i_q + v_{sd} - R_s i_d \quad (19)$$

其中,换流器滤波电阻  $R_s$  很小,其影响可忽略不计;  $v_{sd}$  降低后,桥臂中点电压与  $q$  轴电流成正比,即  $i_q$  将从0变为负值,其数值迅速减小,但无功电流幅值快速增大。

6) 交流电流在线路阻抗  $R_1 + j\omega L_1$  上产生的压降可表示为:

$$\dot{U}_1 = (\dot{I}_d + j\dot{I}_q) (R_1 + j\omega L_1) \quad (20)$$

$$|\dot{U}_1| = \sqrt{(I_d + I_q)^2 R_1^2 + (I_d + I_q)^2 \omega^2 L_1^2} \quad (21)$$

则  $i_q$  幅值增大导致线路上的压降增大。

7) 由于电源侧电压幅值不变,则线路上分压增多导致公共连接点(PCC)电压,即  $v_{sd}$  继续降低,形成正反馈。该故障过程由图5所示。

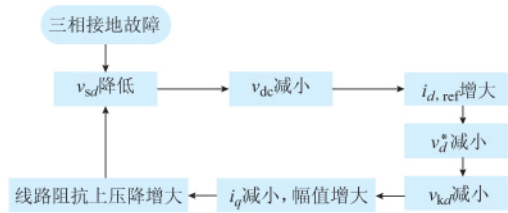


图5 故障过程  
Fig. 5 Fault procedure

由于电压电流环积分影响,故障后,并网侧电压  $v_{sd}$  迅速减小至极小值(可视作0)。故障出现后,并网侧电压  $v_{sd}$  的降低造成有功功率损失,无法满足负载的功率需求,则电容上的能量会被消耗以补充这种损失。可以列出电容上的能量方程为:

$$E_{loss} = C \frac{V_{dc0}^2}{2} - C \frac{V_{dc1}^2}{2} \quad (22)$$

式中:  $V_{dc0}$  为故障发生时刻  $t_0$  的直流电压幅值;  $V_{dc1}$  为故障结束时刻  $t_1$  的直流电压幅值;  $E_{loss}$  为有功功率损失对故障时间的积累。

根据以上故障过程分析,可知并网侧电压  $v_{sd}$  会在极短时间内降至接近0。为了简化计算,可将其视为在  $t_0$  瞬间降至0,则能量损失可以表示为:

$$E_{loss} = v_{sd} i_d (t_1 - t_0) \quad (23)$$

其中并网侧电压  $v_{sd}$  及  $d$  轴电流均为故障发生时刻  $t_0$  的电压、电流,即其值为稳态时的幅值。

根据电容上的全响应方程,有

$$v_{dc}(t) = V_{dc1} + (V_{dc0} - V_{dc1}) e^{-\frac{t}{R_L C}} \quad (24)$$

联立式(22)一式(24)可以得出故障时间内  $v_{dc}$  随时间的变换函数。

则根据式(12)可以得出参考电流在故障时间段随时间的变换函数:

$$i_{d,ref}(t) = g_v(e_v) = g_v(V_{dc,ref} - v_{dc}(t)) \quad (25)$$

由此,可以计算出故障后,即  $t_1$  时刻,换流器参考电流  $i_{d,ref}(t_1)$  的值。比较  $i_{d,ref}(t_1)$  与临界电流  $i_{d,critical}$  的大小,即可判断  $t_1$  时刻系统是否稳定。

### 3 故障耐受能力评估

为对换流器在电网故障后的响应行为进行系统认知,可对三相VSC自身参数对其故障耐受的影响予以分析。以故障深度为60%,故障持续时间为50ms的电网故障为例,根据式(17)、式(24)和式(25)及仿真验证,得出不同坐标下变流器系统稳定区域如图6所示。其中计算结果由星号表示,仿真结果由曲线给出。

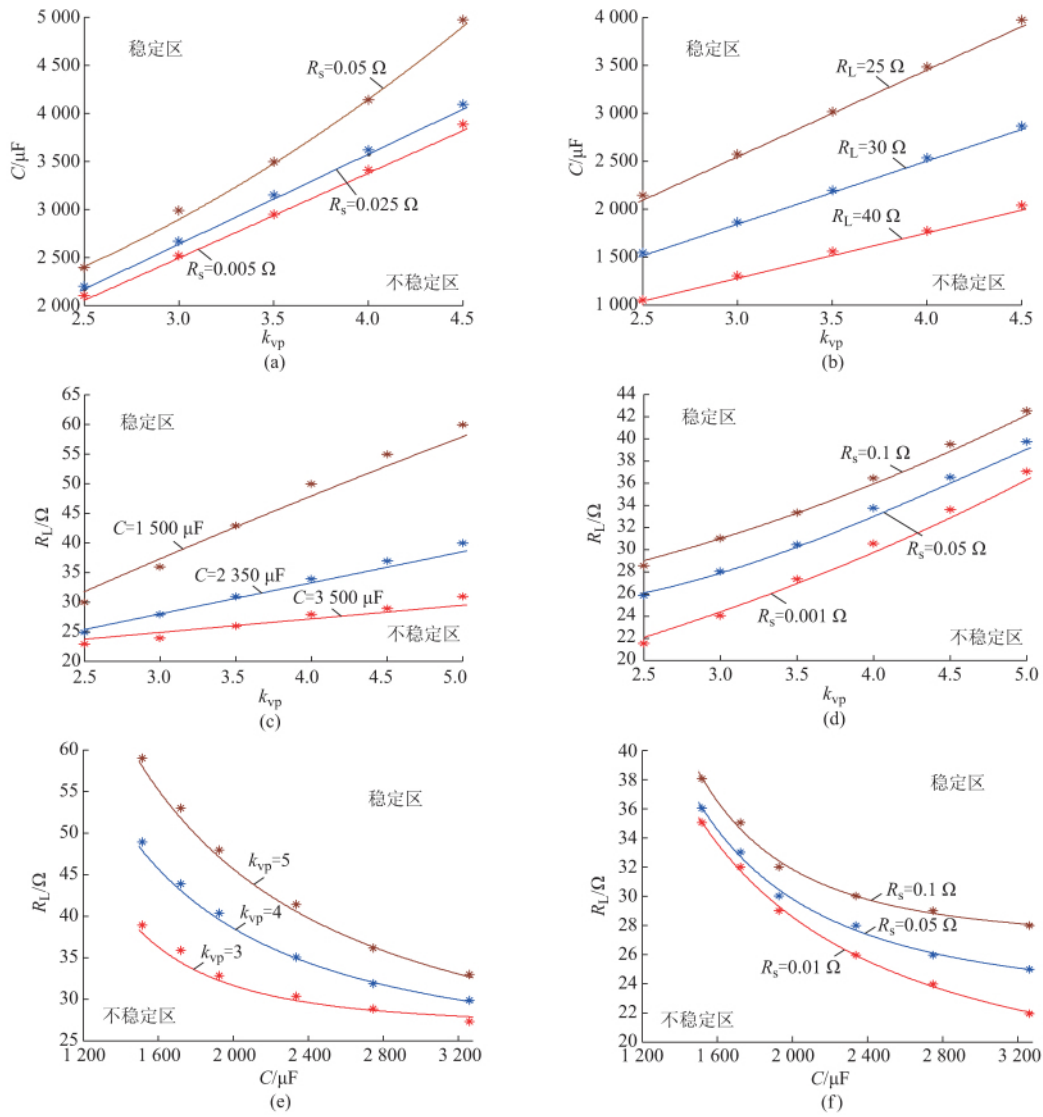


图 6 电网故障下三相 VSC 稳定区域  
Fig. 6 Stability regions of three-phase VSC under power grid fault

图 6 中稳定区域表示该范围内的设计参数能使变流器耐受故障深度为 60%、故障持续时间为 50 ms 的三相短路故障,变流器器件及控制环均能运行,并在故障结束后对电网恢复稳定运行提供支撑。

不稳定区域则代表该范围的设计参数不耐受该故障,变流器在经历灾难性分岔后系统失稳并无法在故障结束后自动恢复。

可以发现,换流器负载  $R_L$  及直流母线电容  $C$  的增加有利于三相 VSC 耐受电网电压跌落冲击,而电网阻抗  $R_s$  与电压环比系数  $k_{vp}$  的减小有利于三相 VSC 耐受电网电压跌落冲击。另外,通过对电流环进行限幅,可以避免电流指令到达临界点,但换流器动态特性也因此受限。

#### 4 结语

本文主要研究了典型微网中的三相 VSC 的瞬态响应机理。当电网系统出现故障冲击扰动时,三相 VSC 会经历非线性的过程,进入非正常工作状态,VSC 控制环路无法自动从故障中恢复。本文采用李雅普诺夫稳定分析初步揭示不稳定现象的物理机制。通过计算及仿真给出了三相 VSC 在电压跌落深度及故障持续时间的参数空间中耐受故障冲击的稳定区域。仿真结果验证了分析计算的有效性。

#### 参考文献

[1] KAURAK V, BLASKO V. A new method to extend linearity of a sinusoidal PWM in the over modulation region [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(5): 1115-1121.  
[2] SANJUAN S. Voltage oriented control of three-phase boost PWM

- converters[D]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2010.
- [3] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [4] ZAMANI M, YAZDANI A, SIDHU T. A control strategy for enhanced operation of inverter-based microgrids under transient disturbances and network faults[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2012, 27(4): 1737-1747.
- [5] HUANG M, WONG S C, TSE C K, et al. Catastrophic bifurcation in three-phase voltage-source converters[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 2013, 60(4): 1062-1071.
- [6] 周德佳 赵争鸣 袁立强, 等. 300 kW 光伏并网系统优化控制与稳定性分析[J]. *电工技术学报* 2008 23(11): 116-122.  
ZHOU Dejia, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Optimum control and stability analysis for a 300 kW photovoltaic grid-connected system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(11): 116-122.
- [7] 赵仁德 赵强 李芳, 等. LCL 滤波的并网变换器中阻尼电阻影响分析[J]. *电力系统及其自动化学报* 2009 21(6): 112-116.  
ZHAO Rende, ZHAO Qiang, LI Fang, et al. Impact of damping resistance on grid inverter with LCL-filter[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2009, 21(6): 112-116.
- [8] 王要强 吴凤江 孙力. 并网逆变器用 LCL 滤波器新型有源阻尼控制[J]. *电力自动化设备* 2011 31(5): 75-79.  
WANG Yaoqiang, WU Fengjiang, SUN Li. Active damping control strategy for LCL filter used in grid-connected converter[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(5): 75-79.
- [9] LEE S, LEE K, HYNH D. Modeling and control of a grid connected VSI using a delta connected LCL filter [C]// 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 10-13, 2008, Orlando, USA: 833-838.
- [10] TIMBUS A, TEODORESCU R, BLAABJERG F, et al. Independent synchronization and control of three phase grid converters [C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, May 23-26, 2006, Taormina, Italy: 1246-1251.
- [11] OSTREM T, SULKOWSKI W, NORUM L E, et al. Grid connected photovoltaic (PV) inverter with robust phase-locked loop (PLL) [C]// 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, August 15-18, 2006, Caracas, Venezuela: 7p.
- [12] KARIMI M G, IRAVANIA M R. A nonlinear adaptive filter for online signal analysis in power systems: applications [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2002, 17(2): 617-622.
- [13] BELKHAYAT M, COOLEY R, WITULSKI A. Large signal stability criteria for distributed systems with constant power loads [C]// Power Electronics Specialists Conference, June 18-22, 1995, Atlanta, USA: 1333-1338.
- [14] ZMOOD D N, HOLMES D G, BODE G H. Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators[J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 2001, 37(2): 601-610.
- [15] SUN J. Small-signal methods for AC distributed power systems—a review[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2009, 24(11): 2545-2554.
- [16] SUDHOFF S D, GLOVER S F, LAMM P T, et al. Admittance space stability analysis of power electronic systems [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(3): 965-973.
- [17] BELKHAYAT M, COOLEY R, ABED E. Stability and dynamics of power systems with regulated converters [C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems, April 30-May 3, 1995, Seattle, USA: 143-145.
- [18] GONG W, S, SHAN M, XU H. Robust current control design of a three phase voltage source converter[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014, 2(1): 16-22.
- [19] GUO X, GUERRERO J M. Abc-frame complex-coefficient filter and controller based current harmonic elimination strategy for three-phase grid connected inverter [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016, 4(1): 87-93.
- [20] HARNEFORS L, BONGIORNO M, LUNDBERG S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3324-3334.
- [21] WAN C, HUANG M, TSE C K, et al. Stability of interacting grid-connected power converters[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, 1(3): 249-257.
- [22] 郭小强 邹伟扬 漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. *中国电机工程学报* 2013 33(3): 22-28.  
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(3): 22-28.
- [23] 王萌 夏长亮 宋战锋, 等. 不平衡电网电压条件下 PWM 整流器功率谐振补偿控制策略[J]. *中国电机工程学报* 2012, 32(21): 46-53.  
WANG Meng, XIA Changliang, SONG Zhanfeng, et al. A power resonance compensation control strategy for PWM rectifiers under unbalanced grid voltage conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(21): 46-53.
- [24] 杜雄 刘延东 孙鹏菊, 等. 消除直流分量影响的并网变流器同步参考坐标系锁相环方法[J]. *电工技术学报* 2013 28(12): 24-31.  
DU Xiong, LIU Yandong, SUN Pengju, et al. SRF-PLL method of grid-tied converter for eliminating the influence of DC components [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(12): 24-31.
- [25] MA K, CHEN W, LISERRE M, et al. Power controllability of a three-phase converter with an unbalanced AC source [J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2015, 30(3): 1591-1604.
- [26] 彭宇 黄萌 查晓明. 微电网故障下三相电压型并网变流器瞬态行为分析[J]. *电源学报* 2016 14(2): 145-151.  
PENG Yu, HUANG Meng, ZHA Xiaoming. Transient response of three-phase grid-connected converters under grid fault [J]. *Journal of Power Supply*, 2016, 14(2): 145-151.

彭宇(1991—)女, 硕士研究生, 主要研究方向: 并网变流器稳定性及非线性分析。E-mail: 1039079148@qq.com  
黄萌(1984—)男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究

方向: 电力电子非线性行为及可靠性分析。E-mail: meng.huang@whu.edu.cn

率电力电子装置。E-mail: xmzha@whu.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

查晓明(1967—),男,博士,教授,主要研究方向:大功

## Fault Tolerance Ability Analysis and Evaluation of Three-phase Voltage Source Converters

PENG Yu<sup>1</sup>, HUANG Meng<sup>1</sup>, ZHA Xiaoming<sup>1</sup>, Chi K. TSE<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Department of Electronic and Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** The three-phase voltage source converter (VSC) is a strongly nonlinear system for a large number of power electronic switching devices and corresponding control links contained. Disturbed by the grid side fault or DC side load change in the AC/DC hybrid system, the large-capacity converter will generate complex response, which brings about unpredictable influences on the power grid. This paper studies the transient response of a three-phase VSC under typical grid fault conditions. Firstly, based on the average mode, the nonlinear characteristic of the inner current loop in the three-phase VSC is analyzed. And the Lyapunov stability criterion is adopted to analyze the stability of VSC after a grid fault. Then the fault depth and duration are taken as indices to evaluate the fault tolerance ability of VSC. Finally, the effectiveness of theoretical analysis and calculation is verified by cycle-by-cycle simulations of the grid-connected system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507118), Hubei Provincial Science and Technology Support Program (No. 2015BAA109), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 410500078).

**Key words:** grid-connected converters; nonlinear analysis; Lyapunov stability; fault tolerance ability

(上接第 108 页 continued from page 108)

薛花(1979—),女,博士,副教授,主要研究方向:分布式电源并网控制技术、非线性理论与控制方法。E-mail: xuehua@shiep.edu.cn

李海霞(1990—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:分布式电源并网变流器非线性控制技术。E-mail:

497011934@qq.com

王育飞(1974—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力储能应用技术、电能质量分析与控制。E-mail: wangyufei@shiep.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

## Nonlinear Differential Flatness Control of Distributed Photovoltaic-Energy Storage DC Generation System

XUE Hua, LI Haixia, WANG Yufei

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** As the traditional converters in distributed photovoltaic-energy storage direct current (DC) generation system will be limited when the power increases or is at higher step-up ratios, four-phase parallel converters are adopted in the proposed system, which can broaden the range of output voltage and suppress oscillation of photovoltaic output voltage. For photovoltaic four-phase parallel boost converters, an improved extremum seeking algorithm is designed to achieve maximum power point tracing and improve the system rapidity and stability in light step change. For energy storage four-phase parallel bidirectional converters, a novel nonlinear control law based on the flatness principle is proposed, which is a simple solution to smooth the output power and stabilize the system with a load mutation or control parameter perturbation. Compared with the conventional proportional-integral control method, the nonlinear differential flatness control algorithm has broader degrees of freedom, fewer steady-state errors and better system stability as proved by simulation and experimental results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407114) and Shanghai Natural Science Foundation (No. 15ZR1418200).

**Key words:** direct current (DC) generation system; differential flatness control; four-phase parallel converters; improved extremum seeking algorithm