

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.007

单相接地故障下 MMC 入网电流耦合机理分析及小信号建模

黄萌, 车江龙, 查晓明, 刘浴霜, 盛举

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 电网侧发生单相接地故障会造成交流电压一定程度的跌落, 此时可通过注入无功电流使模块化多电平换流器(MMC)系统实现故障下的低电压穿越。但接地阻抗会影响整个系统的拓扑结构, 使各序网络之间相互耦合, 因此对该条件下 MMC 系统的建模和稳定性进行分析至关重要。文中首先建立单相接地故障下 MMC 系统交流侧等效模型, 并分析混合注入双序无功电流后的故障穿越过程。然后, 基于 MMC 内部子模块电容电压和桥臂电流的动态特性建立 MMC 系统的小信号模型, 并在分析系统失稳机理的基础上, 利用根轨迹法分析阻抗参数和电流耦合对 MMC 系统小信号稳定性的影响。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建 21 电平 MMC 仿真模型, 仿真结果表明, 电网阻抗减小或接地阻抗增大使得系统趋于不稳定, 负序无功电流注入使得正序无功电流稳定区域增大。

关键词: 模块化多电平换流器(MMC); 单相接地; 序网络; 小信号模型; 电流耦合

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)04-0052-08

0 引言

相比于两电平、三电平电压源换流器(voltage source converter, VSC), 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)以其模块化设计、谐波含量低和输出电压等级高等优点^[1-6], 在高压直流输电领域应用广泛。我国已经投运的上海南汇、广东南澳、浙江舟山等柔性直流输电工程均采用 MMC 拓扑结构。

MMC 系统安全稳定运行是当前的研究热点。当交流侧发生不对称故障, 如电压不对称跌落和单相接地故障等时, 产生的负序分量会给系统带来一系列负面影响, 如输出电压、电流波形畸变等, 此时通过引入双序电流控制可很好地改善电流波形质量^[7-8]。同时, 针对故障引起并网点电压下降的问题, 诸多文献提出通过注入无功电流支撑电压的控制策略。文献[9-10]提出根据电压跌落程度和电网阻抗生成无功电流指令值。文献[11-12]通过分析功率与电流的关系, 实现电压抬升及电流限幅。

对于不同的交流侧故障, 电压不对称跌落下通过相序分离得到的交流侧等效双序回路模型相互独立, 而在单相接地故障下, 接地阻抗的存在会将各个序网络连接起来, 使得各序回路之间相互作用。因此, 无功电流的注入还需考虑序网络间的耦合特性, 同时交流侧阻抗的改变也会对整个系统的稳定性产生不同影响。

目前常采用小信号建模方法进行系统级稳定

性分析, 文献[13-14]基于平均开关函数模型建立考虑内部动态行为的 MMC 系统小信号模型, 并进行相应的模态分析。文献[15]建立基于广义动态相量的小信号模型, 并考虑换流器内部高阶谐波的作用。上述研究均建立于无外部故障扰动的情况, 而当交流侧发生不对称故障时, 系统内部产生的谐波序分量和用于改善波形质量新增的控制环节会增加建模的复杂性。文献[16-18]建立三相对称与不对称电压跌落下 VSC 系统的小信号模型并进行动态特性分析。文献[19-20]基于不对称电网电压条件下的 MMC 系统小信号模型, 分析新增负序电流控制器对稳定性的影响。

为了更好地研究单相接地故障下阻抗参数和电流耦合特性对 MMC 系统稳定性的影响, 文中首先基于交流侧等效模型分析双序网络间的耦合关系, 然后建立对应工况下 MMC 系统的小信号模型, 并分析阻抗变化和电流注入对稳定性的影响过程, 最后给出定量分析结果并进行仿真验证。文中所提分析方法从稳定性角度为单相接地故障下 MMC 系统的参数设计和电流注入策略制定提供了一定参考。

1 单相接地故障下 MMC 系统结构

1.1 MMC 系统拓扑

单相接地故障 F 下并网 MMC 系统拓扑如图 1 所示。MMC 通过 Y- Δ 连接的变压器与非理想电网相连。 U_{dc} 为直流电压源; U_g 为电网电压; Z_g 为交流系统等效阻抗; U_s, I_s 分别为端电压和交流电流; L_f 为滤波电感。

收稿日期: 2021-01-24; 修回日期: 2021-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51637007)

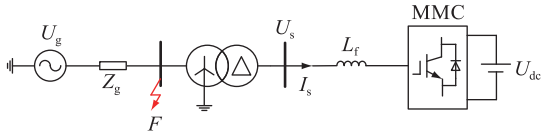


图1 单相接地故障下并网 MMC 系统拓扑

Fig.1 Grid-connected MMC system topology under single-line to ground fault

MMC 三相拓扑如图 2 所示,每一相包含上、下 2 个桥臂,每个桥臂由 N 个子模块(SM)、桥臂电阻 R_0 和电感 L_0 串联组成。 C, C_{eq} 分别为单个子模块电容和单个桥臂的等效电容, $C_{eq} = C/N$; u_{arm}, i_{arm} 分别为桥臂电压和桥臂电流; i_{uj}, i_{lj} 分别为上、下桥臂电流, $j=a, b, c$; u_{sm}, i_{sm} 分别为子模块电容电压和电流; I_{dc} 为直流电流; S 为平均开关函数,表示子模块的投入比例。MMC 可以通过控制子模块的投切,快速调节输出多电平交流电压。

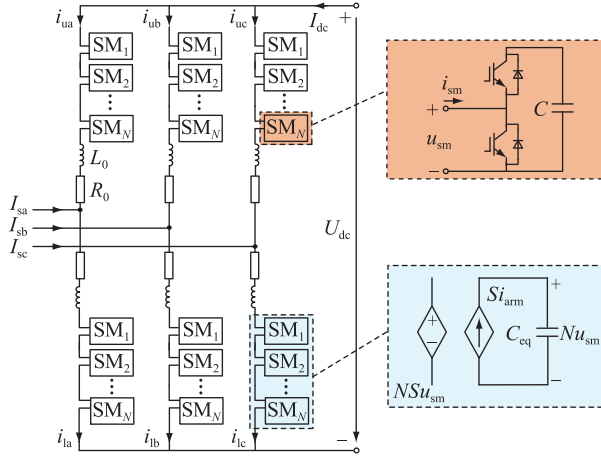


图2 MMC 三相拓扑

Fig.2 The topology of three-phase MMC

1.2 MMC 系统交流侧等效模型

假设单相接地故障发生在 a 相,则图 1 的等效模型和合并后的各序电路分别如图 3、图 4 所示。 Z_F 为接地阻抗; Z_T 为变压器等效阻抗; 上标 +, - 分别表示正序、负序和零序。

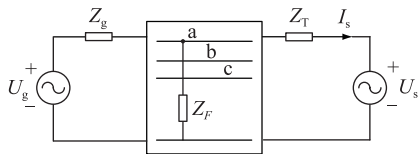


图3 单相接地故障下并网 MMC 系统等效模型

Fig.3 Equivalent model of grid-connected MMC system under single-line to ground fault

由图 4 可知, Z_F 将各个序网络连接起来,导致各个序网络之间相互作用。变压器采用 Y- Δ 连接方式,故交流电压和电流不存在零序分量。系统主要电路参数如表 1 所示。

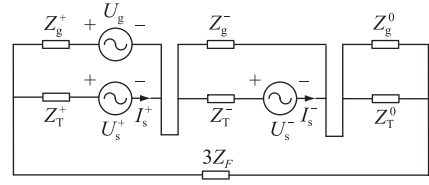


图4 单相接地故障下的序电路

Fig.4 Sequence-domain circuit under single-line to ground fault

表1 MMC 系统主要参数

Table 1 Major parameters of MMC system

参数	数值
U_g/kV	23
U_{dc}/kV	40
$Z_g^+, Z_g^-/\Omega$	$0.3+j3.3$
Z_g^0/Ω	$0.9+j9.9$
Z_F/Ω	$0.6+j7.54$
$Z_T^+, Z_T^-, Z_T^0/\Omega$	$j0.66$
L_0/mH	16
R_0/Ω	0.1
L_f/mH	10
C/mF	13
N	20

由图 4 可得正序、负序电压分别如式(1)、式(2)所示。此外,文中还考虑了变压器对电压、电流相移的作用:在正序网络中, Y 侧电压/电流比 Δ 侧电压/电流超前 30° ,而在负序网络中则刚好相反。

$$U_s^+ e^{j\pi/6} = Z_1 U_g + Z_2 I_s^+ e^{j\pi/6} + Z_3 I_s^- e^{-j\pi/6} \quad (1)$$

$$U_s^- e^{-j\pi/6} = Z_4 U_g + Z_5 I_s^+ e^{j\pi/6} + Z_6 I_s^- e^{-j\pi/6} \quad (2)$$

式中: Z_1-Z_6 如式(3)所示; U_s^+, U_s^- 相位均由锁相环控制。

$$\left\{ \begin{array}{l} |Z_1| \angle \varphi_1 = \frac{Z_g^- + Z}{Z_g^+ + Z_g^- + Z} \\ |Z_2| \angle \varphi_2 = -Z_T^+ - \frac{Z_g^+(Z_g^- + Z)}{Z_g^+ + Z_g^- + Z} \\ |Z_3| \angle \varphi_3 = \frac{Z_g^+ Z_g^-}{Z_g^+ + Z_g^- + Z} \\ |Z_4| \angle \varphi_4 = -\frac{Z_g^-}{Z_g^+ + Z_g^- + Z} \\ |Z_5| \angle \varphi_5 = \frac{Z_g^+ Z_g^-}{Z_g^+ + Z_g^- + Z} \\ |Z_6| \angle \varphi_6 = -Z_T^- - \frac{Z_g^-(Z_g^+ + Z)}{Z_g^+ + Z_g^- + Z} \\ Z = 3Z_F + \frac{Z_g^0 Z_T^0}{Z_g^0 + Z_T^0} \end{array} \right. \quad (3)$$

将 $e^{-j\theta_s}$ 代入式(1)、式(2),其中, θ_s 为锁相环输出相位,转换至 dq 同步旋转坐标系下:

$$U_{sd}^+ = |Z_1| |U_g| \sin(\delta + \varphi_1 - \pi/6) + |Z_2| (I_{sd}^+ \cos \varphi_2 + I_{sq}^+ \sin \varphi_2) + |Z_3| [I_{sd}^- \cos(\varphi_3 - \pi/3) - I_{sq}^- \sin(\varphi_3 - \pi/3)] \quad (4)$$

$$U_{sq}^+ = |Z_1| |U_g| \cos(\delta + \varphi_1 - \pi/6) + |Z_2| (I_{sq}^+ \cos \varphi_2 - I_{sd}^+ \sin \varphi_2) - |Z_3| [I_{sq}^- \cos(\varphi_3 - \pi/3) + I_{sd}^- \sin(\varphi_3 - \pi/3)] \quad (5)$$

$$U_{sd}^- = |Z_4| |U_g| \sin(\delta + \varphi_4 + \pi/6) + |Z_5| [I_{sd}^+ \cos(\varphi_5 + \pi/3) + I_{sq}^+ \sin(\varphi_5 + \pi/3)] + |Z_6| (I_{sd}^- \cos \varphi_6 - I_{sq}^- \sin \varphi_6) \quad (6)$$

$$U_{sq}^- = -|Z_4| |U_g| \cos(\delta + \varphi_4 + \pi/6) - |Z_5| [I_{sq}^+ \cos(\varphi_5 + \pi/3) - I_{sd}^+ \sin(\varphi_5 + \pi/3)] + |Z_6| (I_{sq}^- \cos \varphi_6 + I_{sd}^- \sin \varphi_6) \quad (7)$$

式中: U_{sd}^+ , U_{sq}^+ 为正序电压; U_{sd}^- , U_{sq}^- 为负序电压; I_{sd}^+ , I_{sd}^- 分别为正序、负序有功电流; I_{sq}^+ , I_{sq}^- 分别为正序、负序无功电流; δ 为 θ_g 与 θ_s 之间的相角差, θ_g 为 U_g 相位。

由式(1)、式(2)可知, U_s 特性与 U_g , I_s 间压降有关,同时 $Z_3 I_s^- e^{-j\pi/6}$ 和 $Z_5 I_s^+ e^{j\pi/6}$ 反映了双序网络间的耦合关系:负序电流会对正序电压产生影响,而正序电流会对负序电压产生影响。

当单相接地故障发生后, U_s 幅值会有一定程度的跌落,此时可通过注入无功电流抬升电压。由式(4)~式(7)可知:注入一定的 I_{sq}^+ 会提高 U_{sd}^+ ,但同时也会使得 U_{sd}^- 和 U_{sq}^- 增加;而注入一定的 I_{sq}^- 会同时降低正序、负序电压。因此,将注入的 I_{sq}^+ 和 I_{sq}^- 相配合,可使系统实现故障下的低电压穿越。上述过程如图5所示。发生 a 相接地故障后,在 1 s 时注入 I_{sq}^+ 为 -0.6 kA, 2 s 时注入 I_{sq}^- 为 0.8 kA, U_s 明显改善。

2 小信号模型建立

由于 MMC 子模块电容的分散布置,各个子模块在充放电过程中会出现电容电压波动的情况,进而导致桥臂电流出现二倍频为主的谐波分量。实际上, u_{sm} 和 i_{arm} 的谐波构成了 MMC 的内部动态特性,为建立状态空间模型提供了基础。

为了简化电路分析,假设同一桥臂上的所有子模块可以等效为一个受控电压源,如图2所示,且在排序均压算法下所有 u_{sm} 均相等,则 u_{sm} , u_{arm} , i_{arm} 间的关系为^[21]:

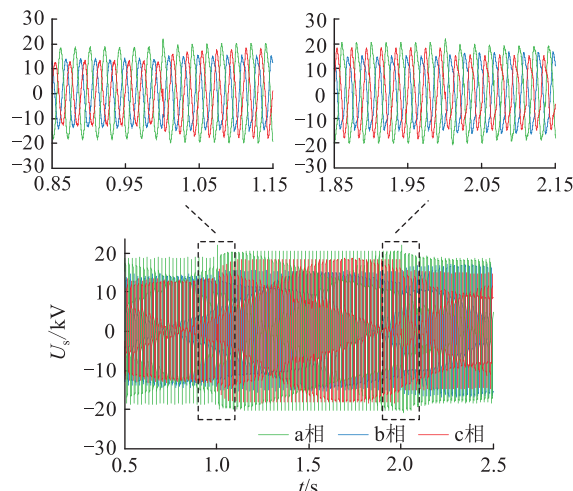


图5 单相接地故障下的低电压穿越过程
Fig.5 Low voltage ride-through process under single-line to ground fault

$$u_{arm} = NSu_{sm} \quad (8)$$

$$C \frac{du_{sm}}{dt} = Si_{arm} \quad (9)$$

在实际应用中,常采用最近电平调制方法控制子模块投切。在不平衡电网条件下,为了改善输出波形质量,部分调制信号还会由引进的负序电流抑制器产生,则上、下桥臂平均开关函数 S_u , S_1 可表示为:

$$\begin{cases} S_u = \frac{1}{2} - \left(\frac{u_c^+}{U_{dc}} + \frac{u_c^-}{U_{dc}} \right) + \frac{U_{cir}}{U_{dc}} \\ S_1 = \frac{1}{2} + \left(\frac{u_c^+}{U_{dc}} + \frac{u_c^-}{U_{dc}} \right) + \frac{U_{cir}}{U_{dc}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_c^+ , u_c^- , U_{cir} 分别为正序电流控制器、负序电流控制器和环流抑制器输出的参考电压。

假设 MMC 的等效开关频率足够高,忽略 u_{sm} 中高于三倍频的分量,则 u_{sm} 可表示为:

$$u_{sm} = u_{smdc} + (u_{sm1}^+ + u_{sm1}^- + u_{sm1}^0) + (u_{sm2}^+ + u_{sm2}^- + u_{sm2}^0) + u_{sm3} \quad (11)$$

式中: u_{smdc} 为直流分量; u_{smk}^+ , u_{smk}^- , u_{smk}^0 为各序分量, $k=1, 2$ 分别表示基频、二倍频; u_{sm3} 为三倍频分量。

交流侧电流无零序分量,但零序分量仍存在于桥臂的二倍频环流中,导致直流侧功率波动。因此上、下桥臂电流表示为:

$$\begin{cases} i_u = \frac{1}{3} I_{dc} - \frac{1}{2} (I_s^+ + I_s^-) + (I_{2f}^+ + I_{2f}^- + I_{2f}^0) \\ i_1 = \frac{1}{3} I_{dc} + \frac{1}{2} (I_s^+ + I_s^-) + (I_{2f}^+ + I_{2f}^- + I_{2f}^0) \end{cases} \quad (12)$$

式中: I_{2f}^+ , I_{2f}^- , I_{2f}^0 为二倍频环流各序分量。

将式(10)、式(12)代入式(9)中,可得到 u_{sm} 各分量的状态方程。同理,将式(10)、式(11)代入式(8),并将所得方程与交直流侧电路的 KVL 方程相结合,即可求出 i_{arm} 各分量的状态方程。因此,基于 u_{sm} 和 i_{arm} 的状态方程即可建立 MMC 的状态空间模型。

MMC 系统控制框图如图 6 所示。相序分离环节中采用同步相位和对称分量实时检测方法^[22],将采集到的三相交流电压和电流变换到 $\alpha\beta$ 参考坐标系下,然后将该 $\alpha\beta$ 分量和相移 90° 后的分量通过图 6 所示的矩阵转换成正负序分量。根据图 6 的控制系统框图,可以得到各控制器的状态方程。

文献[15—16]具体给出了 MMC 和控制系统的状态空间方程,此处不再赘述。将 MMC 与控制系统的状态方程在某一稳态工作点进行线性化,再与式(4)一式(7)线性化后的表达式合并,得到 MMC 系统的小信号模型为:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (13)$$

式中: A 、 B 分别为状态矩阵和输入矩阵; Δx 为状态变量; Δu 为输入变量。

3 系统参数对稳定性的影响

文中主要分析阻抗、电流参数改变使系统失稳的机理,然后利用李雅普诺夫稳定性判据分析参数变化时 MMC 系统的小信号稳定性。即由式(13)求出的所有特征根的实部均为负时,系统在该运行点处受到扰动可以恢复稳定;而当至少一个特征根的

实部为正时,系统在该运行点处受到扰动会失稳。

3.1 阻抗参数对稳定性的影响

交流侧阻抗大小影响锁相环的动态特性,进而影响系统的动态特性。单相接地时, Z_F 改变了系统交流侧的拓扑结构,使得各序电网阻抗之间、 Z_g 与 Z_F 之间相互耦合,如式(3)所示,共同影响系统的稳定性。

为了更好地说明阻抗变化对电压的影响,文中假设:负序电流被抑制为 0,且正序电流能迅速跟踪指令值;负序电压相对正序电压较小,暂不考虑功率波动对稳定性的影响;电阻相比于电感足够小,阻抗角接近于 90° 。

则式(4)、式(5)可以改写为:

$$U_{sd}^+ = |Z_1| |U_g| \sin(\delta - \pi/6) \quad (14)$$

$$U_{sq}^+ = |Z_1| |U_g| \cos(\delta - \pi/6) + |Z_2| |I_{sd}^+| = 0 \quad (15)$$

进而求出有功功率 P 为:

$$P = |Z_1| |U_g| |I_{sd}^+| \sin(\delta - \pi/6) \quad (16)$$

功角特性曲线如图 7 所示, P_1 为扰动前的有功功率。由式(15)可知,扰动前的相角差 $\delta_1 > 2\pi/3$ 。 Z_g 减小或 Z_F 增大时, $|Z_1|$ 增大, $|Z_2|$ 减小,从而使 U_{sd}^+ 增大, U_{sq}^+ 减小。此时由于瞬时功率增加 ΔP ,而相角无法瞬时跳变,系统工作点会由 a 点升至 b 点。在锁相环调节作用下, U_{sq}^+ 减小导致 δ_1 减小,系统工作点会沿新的功角特性曲线移向 c 点。若在 d 点之前由于扰动积累的能量被系统全部吸收,即加速面积 ΔS_1 小于减速面积 ΔS_2 ,则系统工作点将会稳定

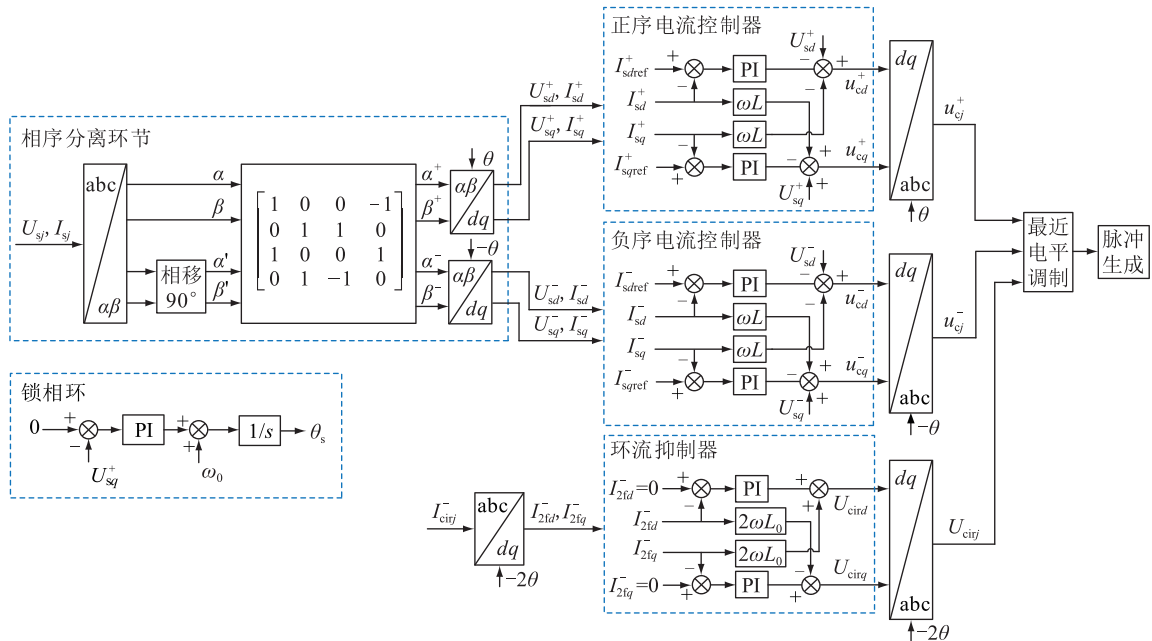


图 6 交流侧不对称情况下 MMC 系统控制框图

Fig.6 Block diagram of MMC control system under unbalanced grid conditions

在 c 点,否则工作点会越过 d 点, δ_1 会继续减小,从而系统失稳。

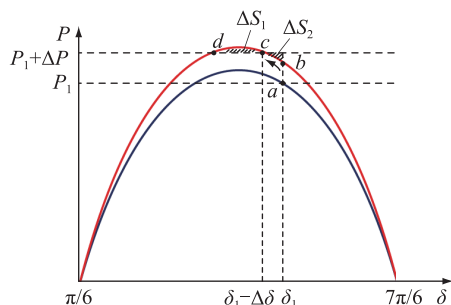


图7 功角特性

Fig.7 Characteristic of power-angle

阻抗参数变化时系统特征根轨迹如图 8 所示。图 8(a)中,当 Z_g 幅值 $|Z_g|$ 由 3.31Ω 逐渐减小至 1.32Ω 时,部分特征根会远离虚轴,但主导模态对应的特征根会靠近虚轴,说明发生单相接地故障时, $|Z_g|$ 减小会削弱 MMC 系统的小信号稳定性。而当 $|Z_g|$ 减小至 1.69Ω 时,会有一对特征根越过虚轴,使得系统失去稳定。图 8(b)中, Z_F 幅值 $|Z_F|$ 由 7.57Ω 逐渐增大至 15.14Ω 时,主导模态对应的特征根逐渐靠近虚轴,导致 MMC 系统的小信号稳定性减弱。当 $|Z_F|$ 增大至 13.18Ω 时,会有一对特征根进入不稳定区域。

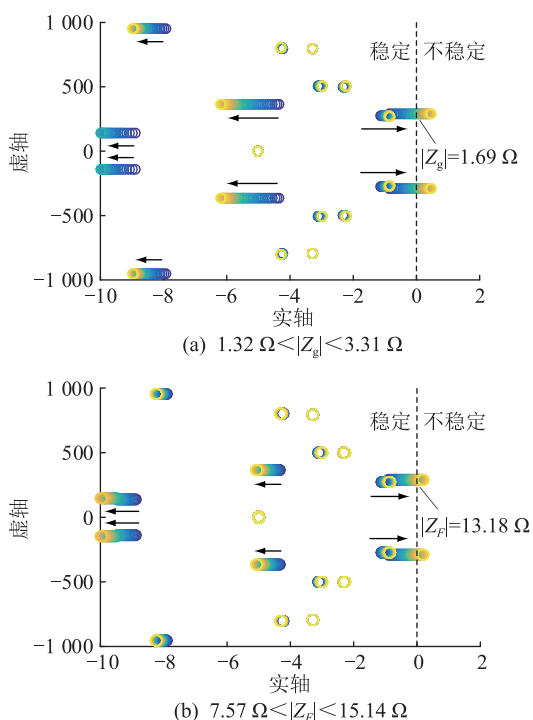


图8 阻抗参数变化时系统根轨迹

Fig.8 Root-locus with varying impedance

3.2 电流耦合对稳定性的影响

由 1.2 节可知,注入一定的 I_{sq}^+ 和 I_{sq}^- 能够很好地

实现单相接地故障下的低电压穿越。事实上,由于 I_{sq}^+ 和 I_{sq}^- 均会改变正序电压的大小,其共同注入与分别单独注入对系统稳定性的影响不同。文中以仅注入 I_{sq}^+ 、同时注入 I_{sq}^+ 和 I_{sq}^- 为例,分别分析电流耦合对稳定性的影响机理。

通过式(1)可以得到单相接地故障下正序电压相量图,如图 9 所示。仅注入 I_{sq}^+ 时,随着 I_{sq}^+ 幅值逐渐增大, $Z_2 I_s^+ e^{j\pi/6}$ 的幅值也会增大,且向逆时针方向移动,系统稳定工作点将从 e 点向 f 点移动,而当工作点越过 f 点来到 g 点,由于无法在圆内构成闭合的矢量三角形,系统将会失去稳定性。而同时注入 I_{sq}^+ 和 I_{sq}^- 时, I_{sq}^- 的注入使图 9(a)中无法闭合的矢量三角形形成一个新的闭合回路,说明 I_{sq}^- 的注入使得 I_{sq}^+ 的极限值增大,增强了系统的稳定性。

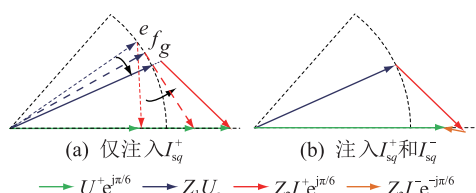


图9 正序电压相量图

Fig.9 Phasor diagram of positive sequence voltage

图 10 为 I_{sq}^- 注入前后, I_{sq}^+ 由 0 逐渐变化至 -1.5 kA 时系统的特征根轨迹。由图 10 可知,系统整体的小信号稳定性随着 I_{sq}^+ 的增大而减弱,且超过一定值时会有一对特征根越过虚轴,使得系统失去稳定性。比较图 10(a)、(b)可知,当 I_{sq}^- 为 0.4 kA 时,使系统失稳的 I_{sq}^+ 临界值由 0.9 kA 增大为 1.4 kA ,说明单相接地故障下双序无功电流注入比仅 I_{sq}^+ 注入更具优势。

4 仿真实验

为了验证第 3 章稳定性分析理论的正确性,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建如图 1 所示的 21 电平 MMC 系统模型。MMC 系统主要仿真参数如表 1 所示。各控制器参数设置为:锁相环比例积分(proportional integral, PI)参数 k_{ppl} , k_{ipll} 分别为 $0.2, 1000$;正序电流控制器 PI 参数 k_{p1} , k_{i1} 分别为 $5, 100$;负序电流控制器 PI 参数 k_{p2} , k_{i2} 分别为 $5, 100$;环流抑制器 PI 参数 k_{p2f} , k_{i2f} 分别为 $20, 100$ 。通过观察 I_{sd}^+ , I_{sq}^+ , U_{sd}^+ , U_{sq}^+ , P, Q, I_{dc} 的输出波形判断系统的运行状态。

4.1 阻抗参数变化的稳定性验证

保持其他参数不变,在 2 s 时 $|Z_g|$ 由 3.31Ω 减小至 1.32Ω ,仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知,

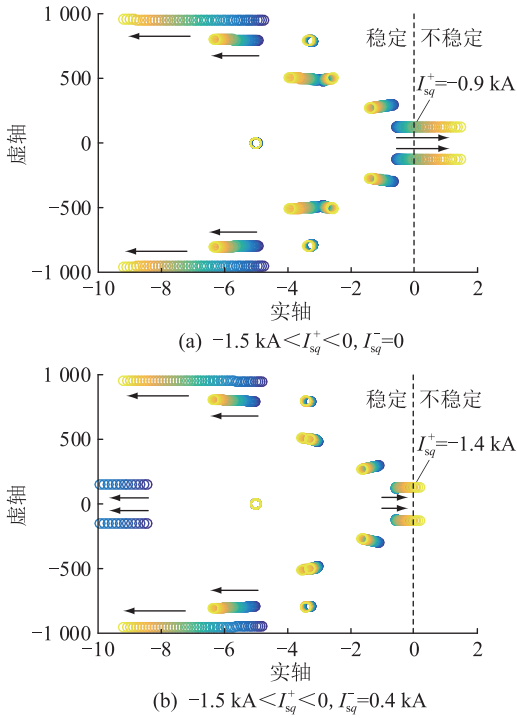


图 10 I_{sq}^+ 变化时系统根轨迹
Fig.10 Root-locus with varying I_{sq}^+

$|Z_g|$ 减小使得 U_{sd}^+ 和 P 增大一定值后振荡发散,其他参数在恢复到原来水平的过程中也会逐渐发散,说明系统已经失稳。

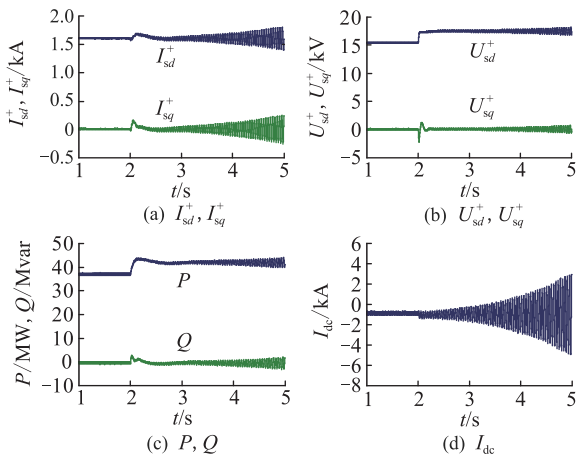


图 11 $|Z_g|$ 变化时的仿真验证
Fig.11 Simulation validation with varying $|Z_g|$

在 2 s 时, $|Z_F|$ 由 7.57Ω 增大至 15.14Ω , 仿真结果如图 12 所示,此时系统出现了很明显的振荡失稳现象,验证了理论分析的正确性。

4.2 电流耦合的稳定性验证

其他参数不变,2 s 时只注入 -1.1 kA 的 I_{sq}^+ , 仿真结果如图 13 所示,系统工作点越过了稳定区域而迅速失稳。

对比于图 13,在已注入 I_{sq}^- 为 0.4 kA 的情况下,

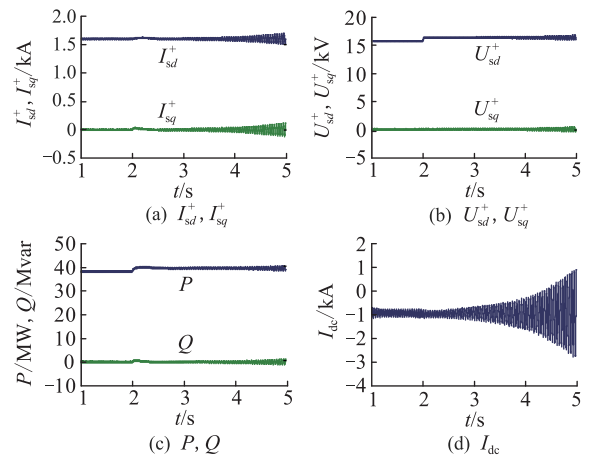


图 12 $|Z_F|$ 变化时的仿真验证
Fig.12 Simulation validation with varying $|Z_F|$

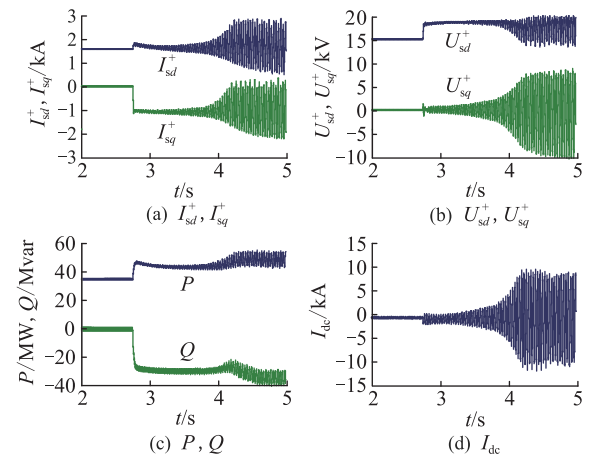


图 13 仅注入 I_{sq}^+ 的仿真验证
Fig.13 Simulation validation with only injection of I_{sq}^+

2 s 时注入相同大小的 I_{sq}^+ , 仿真结果如图 14 所示。系统工作点未越过稳定区域,故能恢复稳定。

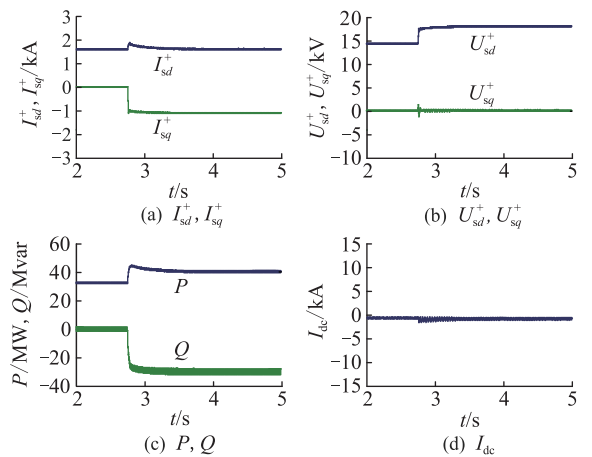


图 14 混合注入 I_{sq}^+ 和 I_{sq}^- 的仿真验证
Fig.14 Simulation validation with mixed injection of I_{sq}^+ and I_{sq}^-

5 结论

文中首先建立了单相接地故障下考虑接地阻抗的 MMC 系统交流侧序网络模型,并给出了端电压表达式,然后与 MMC 及控制系统的状态方程联立并线性化得到 MMC 系统的小信号模型。对所得模型进行稳定性分析,其主要结论如下:

(1) 减小 Z_g 或增大 Z_F ,使有功功率增加的同时也会使电网电压与并网点电压之间的相角差减小,不利于 MMC 系统的稳定性。

(2) 由于序网络间的耦合关系, I_{sq}^+ 的注入能同时抬升正序和负序电压;而 I_{sq}^- 的注入则会同时使正序和负序电压降低。与仅注入 I_{sq}^+ 情况相比, I_{sq}^- 的注入能改善系统的稳定性。因此,双序无功电流的配合注入可抬升电压,同时降低电压不平衡度。

参考文献:

[1] DEBNATH S, QIN J C, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.

[2] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-15.
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZENG Qionglin, et al. A review of modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-15.

[3] LI G, AN T, LIANG J, et al. Studies of commutation failures in hybrid LCC/MMC HVDC systems [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 193-204.

[4] 彭鹏,陈满,梁靓,等. 相内快速 SOC 均衡时 MMC-BESS 运行边界研究[J]. 供用电, 2020, 37(9): 78-84.
PENG Peng, CHEN Man, LIANG Liang, et al. Analysis of operation boundary for modular multi-level converter energy storage system with inner phase rapid state of charge balancing [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 78-84.

[5] 徐雨哲,徐政,张哲任,等. 基于 LCC 和混合型 MMC 的混合直流输电系统控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 13-25.
XU Yuzhe, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Control strategy for hybrid HVDC transmission system based on LCC and hybrid MMC [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 13-25.

[6] 曾繁耀,乐开平,韩韬. MMC 低开关频率子模块均压控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 99-106.
ZENG Fanyao, YUE Kaiping, HAN Tao. Voltage-sharing control strategy for MMC low switching frequency sub-module [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 99-106.

[7] 肖亮,徐政,刘昇,等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 送端交流故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 89-98.
XIAO Liang, XU Zheng, LIU Sheng, et al. AC fault ride-through strategy of MMC-HVDC connected to passive networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15):

89-98.

[8] 管敏渊,徐政,潘武略,等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1238-1245.
GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Wulue, et al. Analysis and control of modular multilevel converter based HVDC transmission systems during grid faults [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1238-1245.

[9] 欧阳森,马文杰. 考虑电压故障类型的光伏逆变器低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 21-26.
OUYANG Sen, MA Wenjie. Low voltage ride through control strategy of photovoltaic inverter considering voltage fault type [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 21-26.

[10] MIRET J, CAMACHO A, CASTILLA M, et al. Control scheme with voltage support capability for distributed generation inverters under voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5252-5262.

[11] 雷金勇,葛俊,谈赢杰,等. 三相四桥臂逆变器不对称故障穿越限流控制及电网电压支撑改进策略[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 944-952.
LEI Jinyong, GE Jun, TAN Yingjie, et al. Asymmetrical fault-ride-through strategy of three-phase four-leg inverter with current limitation and grid voltage support [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 944-952.

[12] 施佳斌,季亮,常潇,等. 不对称电压跌落下考虑场景区分的逆变器分布式电源控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 9-17.
SHI Jiabin, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Control strategy for inverter-interfaced distributed generation during unbalanced voltage sag considering scenario classification [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 9-17.

[13] 李探,GOLE A M,赵成勇. 考虑内部动态特性的模块化多电平换流器小信号模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2890-2899.
LI Tan, GOLE A M, ZHAO Chengyong. Small-signal model of the modular multilevel converter considering the internal dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2890-2899.

[14] 王燕宁,郭春义,王焯. 控制系统对两端 MMC-HVDC 系统小信号稳定性的影响[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(10): 20-31.
WANG Yanning, GUO Chunyi, WANG Ye. Impact of control system on small-signal stability of two-terminal MMC-HVDC system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(10): 20-31.

[15] SAKINCI Ö C, BEERTEN J. Generalized dynamic phasor modeling of the MMC for small-signal stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 991-1000.

[16] WANG X W, YAO J, PEI J X, et al. Analysis and damping control of small-signal oscillations for VSC connected to weak AC grid during LVRT [J]. IEEE Transactions on Energy Con-

- version, 2019, 34(3):1667-1676.
- [17] MORTAZAVIAN S, SHABESTARY M M, MOHAMED Y A R I. Analysis and dynamic performance improvement of grid-connected voltage-source converters under unbalanced network conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10):8134-8149.
- [18] MORTAZAVIAN S, MOHAMED Y A R I. Dynamic analysis and improved LVRT performance of multiple DG units equipped with grid-support functions under unbalanced faults and weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10):9017-9032.
- [19] ZHU J H, HU J B, WANG S C, et al. Small-signal modeling and analysis of MMC under unbalanced grid conditions based on linear time-periodic (LTP) method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1):205-214.
- [20] GUO C Y, YANG J Y, ZHAO C Y. Investigation of small-signal dynamics of modular multilevel converter under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3):2269-2279.
- [21] HARNEFORS L, ANTONOPOULOS A, NORRGA S, et al. Dynamic analysis of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7):2526-2537.
- [22] 马世强, 余利霞, 郑连清. MMC-HVDC 交流侧不对称故障特性分析与保护策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(6):35-42, 63.
- MA Shiqiang, YU Lixia, ZHENG Lianqing. Characteristics analysis of MMC-HVDC AC asymmetric fault and protection strategy[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2015, 42(6):35-42, 63.

作者简介:



黄萌

黄萌(1984),男,博士,副教授,研究方向为电力电子变换器非线性行为及应用、电力电子装置可靠性分析(E-mail:meng.huang@whu.edu.cn);

车江龙(1997),男,硕士在读,研究方向为电力电子化电力系统稳定性分析;

查晓明(1967),男,博士,教授,研究方向为大功率电力电子装置。

Current coupling mechanism and small signal modeling for MMC under single-line to ground fault conditions

HUANG Meng¹, CHE Jianglong¹, ZHA Xiaoming¹, LIU Yushuang¹, SHENG Ju¹

(School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Single-line to ground fault occurring on the grid side causes certain drops in alternating current (AC) voltage. At this time, the modular multilevel converter (MMC) system is able to achieve low voltage ride-through under fault with the injection of reactive current. However, the grounding impedance affects the topology of the whole system, thus leading to couplings among the sequence networks. Therefore, modeling and stability analysis of MMC system is of vital significance in this case. The equivalent model of MMC AC system disturbed by single-line to ground fault is established, and the process of fault ride-through with the mixed injection of dual-sequence reactive current is analyzed. Then, based on internal dynamic characteristics of submodule capacitor voltage and arm current of MMC, the small signal model is established. The influence of impedance parameters and current couplings on small signal stability of MMC are analyzed by using the root-locus method on the basis of system instability mechanism. Finally, a 21-level MMC simulation model is built in PSCAD/EMTDC and the simulation results show that the decrease of the grid impedance or the increase of the ground impedance makes the system tend to be unstable. And the injection of negative sequence reactive current expands the stable region of positive sequence reactive current.

Keywords: modular multilevel converter (MMC); single-line to ground; sequence network; small signal model; current couplings

(编辑 吴楠)