

基于 P - Q 控制模式的 VSC-HVDC 小干扰稳定性研究

张志军, 李帆, 孟庆波

(郑州铁路职业技术学院 电气工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对目前基于电压源换流器型高压直流输电(VSC-HVDC)工程中常采用的定有功功率-定无功功率(P - Q)控制模式,建立了基于 P - Q 控制模式的VSC-HVDC系统的小干扰数学模型,分析了整流和逆变工作状态下交流系统强度、等值阻抗角、无功功率运行点对VSC-HVDC稳定性的影响;提出了一种综合考虑系统小干扰稳定性和电压安全运行约束的临界运行短路比(CSCR)指标,可以定量评估不同运行工况下VSC-HVDC系统的安全稳定运行极限,为VSC-HVDC系统的安全稳定运行提供理论依据;最后在PSCAD/EMTDC下搭建仿真模型,验证了分析结论的正确性。

关键词: 电压源换流器;小干扰稳定性;特征值分析;运行极限

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19385

Small-signal Stability Analysis of VSC-HVDC Based on P - Q Control Mode

ZHANG Zhijun, LI Fan, MENG Qingbo

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou Railway Vocational & Technical College,
Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: The constant active power-reactive power (P - Q) control mode is widely used in voltage source converter based high voltage direct current projects. To evaluate the small-signal stability of the VSC-HVDC system based on P - Q control mode, a small-signal model was deduced. Based on this model, the impact of AC system strength, equivalent impedance angle and reactive power operating points on the stability of VSC-HVDC working as rectifier or inverter were analyzed. The critical operating short circuit ratio (CSCR) satisfied both the small-signal stability and safe voltage operating constraint were investigated, which provided useful information to evaluate the operating limits of VSC-HVDC based on P - Q control mode. Finally, the analysis results were verified by a detailed VSC-HVDC model built in PSCAD/EMTDC.

Key words: voltage source converter; small-signal stability; eigenvalue analysis; operating limit

基于电压源换流器型高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)系统,因其显著的技术优势目前已在电网异步互联、跨区域电力输送、新能源规模化送出、孤岛及弱系统供电等领域得到了广泛的工程应用^[1-3]。

针对VSC-HVDC运行极限和小干扰稳定性的研究已成为学术界的研究热点,国内外学者围绕VSC-HVDC的小干扰建模、优化控制策略、稳定运行极限等领域开展研究,并取得了卓尔有效

的研究成果。文献[4]和文献[5]分别建立了基于 dq 电流矢量控制(vector current control, VCC)的两电平拓扑结构和模块化多电平换流器拓扑结构的VSC-HVDC小干扰模型,为VSC-HVDC系统的稳定性分析及参数优化设计奠定了基础,其中文献[4]研究表明基于定有功功率-交流电压(P - U)控制模式的VSC-HVDC在联结弱交流电网工况下易出现由锁相环(phase locked loop, PLL)引起的振荡失稳现象,文献[6-10]针对上述问题,对VCC控制提出了优化改进方案,通过在

基金项目: 2017河南省科技攻关(工业)(172102210560); 2018年郑州铁路职业技术学院教研基金项目(2018JKY003)

作者简介: 张志军,男(1969—),硕士,副教授,Email: zzzj_69@163.com

控制系统中引入前馈分量,达到向系统提供额外阻尼的效果,提高VSC-HVDC联结弱交流系统工况下的稳定性;但上述文献并未涉及目前工程中更为广泛采用的定有功功率-定无功功率(P - Q)控制模式的VSC-HVDC小干扰稳定性,文献[5]重点分析了基于 P - Q 控制模式的MMC换流器内部谐波稳定性,但并未对MMC与交流系统之间的耦合影响进行深入分析,因此难以对不同运行工况下MMC-HVDC系统的安全运行和稳定裕度做出定量评估。

考虑目前实际投入工程应用的柔性直流输电工程一般采用 P - Q 控制模式,交流系统的潮流、等效SCR和阻抗角等关键参数随着系统网架结构或运行调度指令的改变而发生变化,导致基于 P - Q 控制模式的VSC换流站运行在不同的功率运行点(有功和无功指令都可能发生变动),甚至出现潮流反转,VSC换流站运行模式切换的工况,从而影响VSC换流站的运行极限;而目前已有文献对VSC运行极限的研究并未综合考虑运行约束条件和小干扰稳定性的影响,如何综合定量评估交流系统网架结构变化或运行方式改变对VSC-HVDC系统安全稳定运行裕度的影响,具有重要的学术研究和工程实用价值。

本文首先建立了基于 P - Q 控制模式的VSC-HVDC系统小干扰数学模型,在此基础上,采用特征值轨迹分析方法,重点分析研究了整流和逆变工作状态下交流系统强度、等值阻抗角、无功功率运行点对VSC-HVDC系统的小干扰稳定性的影响;提出了一种综合考虑系统小干扰稳定和电压安全运行约束条件的临界运行短路比(critical operating short circuit ratio, COSCR)指标,可以定量评估不同运行工况下满足小干扰稳定极限及系统运行约束条件的VSC-HVDC系统稳定裕度,为VSC-HVDC系统安全稳定运行极限提供理论借鉴。

1 基于 P - Q 控制模式的VSC-HVDC数学模型

VSC-HVDC连接交流电网的主电路及相应控制系统结构如图1所示。其中VSC-HVDC换流站采用MMC拓扑,等效交流系统采用戴维南等效电压源 $U_s \angle \theta_s$ 和戴维南等效阻抗 $Z_s \angle \alpha_s = R_s + j\omega L_s$ 串联的结构; $U_i \angle \theta_i$ 和 $U_c \angle \theta_c$ 分别为交流侧公

共连接点电压和MMC端口输出电压; $Z_{eq} \angle \alpha_{eq} = R_{eq} + j\omega L_{eq}$ 为包含联接变压器的等效损耗电感和电阻以及MMC桥臂电感的等效阻抗; P, Q, U_{dc} 分别为MMC输出的有功功率、无功功率以及直流侧电压。MMC控制系统采用双环结构的电流矢量控制,通过外环定有功功率及定无功功率控制器产生内环电流控制器的参考指令 i_{dref}, i_{qref} ;内环电流控制器通过跟踪电流指令生成MMC阀基控制所需的调制波,并最终经过调制后的触发信号控制MMC换流站。

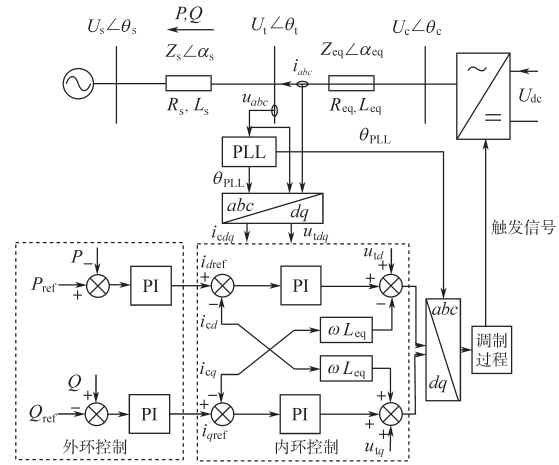


图1 VSC-HVDC主电路及控制系统结构

Fig. 1 Main circuit and control system structure of VSC-HVDC system

在系统一次参数及控制参数的合理配置情况下,可近似认为MMC内部动态过程稳定^[5],从而可得到忽略MMC内部动态特性的数学模型,包括主电路数学模型和控制系统数学模型2部分(忽略MMC内部动态特性建立的数学模型在本质上与两电平VSC换流器一致,因此下文结论同样适用于两电平VSC)。

1.1 主电路数学模型

根据图1,VSC-HVDC在 d - q 坐标系下的主电路数学模型可表示为

$$\begin{cases} L_{eq} \dot{i}_{cd} = u_{cd} - u_{td} - R_{eq} i_{cd} + \omega L_{eq} i_{cq} \\ L_{eq} \dot{i}_{cq} = u_{cq} - u_{tq} - R_{eq} i_{cq} - \omega L_{eq} i_{cd} \\ L_s \dot{i}_{sd} = u_{td} - u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega L_s i_{sq} \\ L_s \dot{i}_{sq} = u_{tq} - u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega L_s i_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{td}/u_{tq}, u_{cd}/u_{cq}, i_{cd}/i_{cq}$ 以及 u_{sd}/u_{sq} 分别为交流母线电压 U_i ,MMC输出端口电压 U_c ,电流 I_c 和等效电动势 U_s 在 d - q 坐标系下的 d, q 分量。

VSC输出的有功功率 P 和无功功率 Q 可表示为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_{td}i_{cd} + u_{tq}i_{cq}) \\ Q = -\frac{3}{2}(u_{td}i_{cq} - u_{tq}i_{cd}) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 控制系统数学模型

VSC的控制系统主要包含PLL数学模型和电流矢量控制模型。其中,PLL数学模型根据文献[4]可表示为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_{PLL} = \omega \\ \dot{\omega} = K_{pPLL}\dot{u}_{tq} + K_{iPLL}u_{tq} \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_{PLL} 和 ω 分别为PLL输出的相角和角速度; K_{pPLL} , K_{iPLL} 分别为PLL的比例增益和积分增益。

根据图1建立VSC外环有功功率/无功功率控制器及内环电流控制器的数学模型:

$$\begin{cases} i_{dref} = K_{pP}(P_{ref} - P) + K_{iP}x_P \\ \dot{x}_P = (P_{ref} - P) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} i_{qref} = K_{pQ}(Q - Q_{ref}) + K_{iQ}x_Q \\ \dot{x}_Q = (Q - Q_{ref}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{td} - \omega L_{eq}i_{cq} + K_{pid}(i_{dref} - i_{cd}) + K_{iid}x_{id} \\ \dot{x}_{id} = (i_{dref} - i_{cd}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{cq} = u_{tq} + \omega L_{eq}i_{cd} + K_{piq}(i_{qref} - i_{cq}) + K_{iiq}x_{iq} \\ \dot{x}_{iq} = (i_{qref} - i_{cq}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{ref} , Q_{ref} 为有功功率和无功功率参考值; i_{dref} , i_{qref} 分别为电流内环参考值; K_{pid} , K_{iid} 和 K_{piq} , K_{iiq} 分别为d轴电流和q轴电流控制器比例及积分增益; x_{id} , x_{iq} 分别为d轴电流和q轴电流控制器内部状态变量。

联立式(1)~式(7),并在VSC-HVDC稳态运行点处经线性化处理后可建立系统的小干扰模型:

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + B \Delta U \quad (8)$$

其中

$$\Delta X = [\Delta i_{cd} \ \Delta i_{cq} \ \Delta \theta_{PLL} \ \Delta \omega \ \Delta x_P \ \Delta x_Q \ \Delta x_{id} \ \Delta x_{iq}]^T$$

$$\Delta U = [\Delta P_{ref} \ \Delta Q_{ref}]^T$$

式中: ΔX 为系统状态向量; ΔU 为系统的输入向量; A , B 为系数矩阵。

根据式(8)可分析VSC-HVDC系统的小干扰稳定性和稳态运行极限。

为了验证所建立的VSC-HVDC小干扰模型的准确性,分别在PSCAD/EMTDC和Matlab下建立如图1所示的VSC-HVDC详细电磁暂态模型与小干扰模型,VSC换流站采用MMC拓扑,具体主电路参数为:额定有功功率 $P_{d2N}=1.0$ (标么值)(1 000 MW);联接变压器额定变比 $T_2=525/375$;联接变压器漏抗 $X_{T2}=0.14$ (标么值);交流系统1.0

(标么值)(500 kV, $SCR_2=2.0$);桥臂子模块数 $N=310$;桥臂电抗105 mH;等效电抗 $X_{eq}=0.15$ (标么值);子模块电容值 $C=8\ 000\ \mu\text{F}$;直流电压 $U_{d2}=\pm 350\ \text{kV}$ 。控制系统参数为:锁相环 $K_{pPLL}=10$, $K_{iPLL}=50$;有功功率外环 $K_{pP}=0.2$, $K_{iP}=20$;无功功率外环 $K_{pQ}=0.2$, $K_{iQ}=20$;d-电流内环 $K_{pid}=1.0$, $K_{iid}=100$;q-电流内环 $K_{piq}=1.0$, $K_{iiq}=100$ 。

图2为VSC-HVDC详细模型与小干扰模型的有功功率指令在1.0 s由1.0(标么值)阶跃至0.95(标么值)时,VSC输出的有功功率与无功功率的阶跃特性对比仿真波形。从图2可知,VSC-HVDC小干扰模型的阶跃特性基本与详细模型重合一致,验证了本文所建立的VSC-HVDC小干扰模型的准确性。

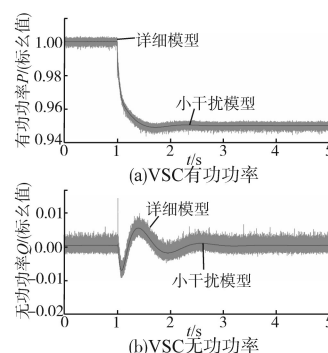


图2 VSC-HVDC有功、无功功率阶跃特性对比

Fig. 2 Comparisons for active power and reactive power step-change response of VSC-HVDC

2 基于P-Q控制模式的VSC-HVDC小干扰稳定性影响分析

本小节将基于建立的小干扰模型,分析不同运行工况对基于P-Q控制模式的VSC-HVDC系统的小干扰稳定性。

2.1 交流系统等值阻抗角的影响

当VSC-HVDC所连接等效交流系统的阻抗角分别为 90° , 85° 和 80° ,逐渐减小交流系统SCR使其在4.0~1.0范围内变化,根据式(8)计算得到VSC运行在逆变($P_{ref}=1.0$ (标么值), $Q_{ref}=0$ (标么值))和整流工作状态($P_{ref}=-1.0$ (标么值), $Q_{ref}=0$ (标么值))下的特征值轨迹如图3所示。根据图3可知交流系统的等值阻抗对VSC-HVDC系统的小干扰稳定性影响很大,当交流系统阻抗角 $\theta_s=90^\circ$ 时,运行在整流和逆变工作状态的VSC-HVDC系统具有相同的临界短路比CSCR,CSCR=2.0;随着阻抗角的减小,运行在整流工作状态

的VSC-HVDC的CSCR逐渐增大,而逆变工作状态下的CSCR逐渐减小,即随着阻抗角的减小,运行在整流工作状态下的VSC-HVDC系统相比逆变工作状态下,其稳定运行需更强的交流系统支撑。

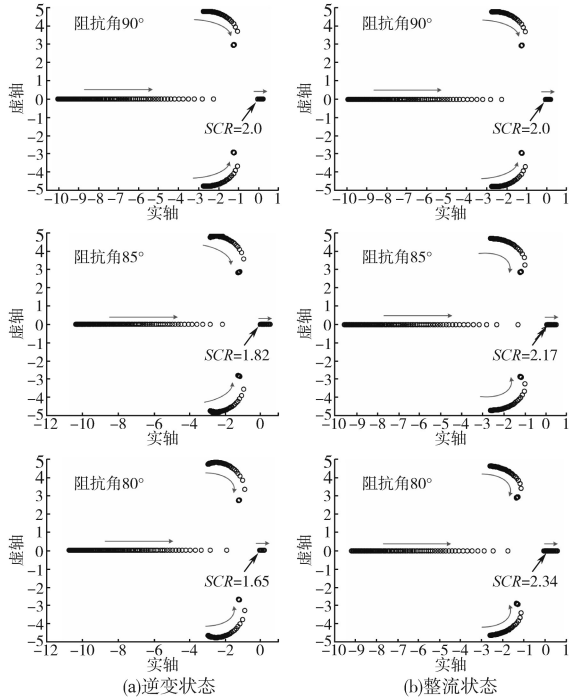


图3 不同系统等值阻抗角的VSC-HVDC系统特征值轨迹

Fig. 3 Eigenvalue locus of VSC-HVDC system with different impedance angle

图4为运行在逆变($P_{ref}=1.0$ (标么值), $Q_{ref}=0$ (标么值))和整流工作状态($P_{ref}=-1.0$ (标么值), $Q_{ref}=0$ (标么值))的VSC-HVDC连接不同交流系统等值阻抗时,VSC交流母线电压 U_i 与交流系统SCR的变化曲线。从图4中可得到仅考虑VSC-HVDC系统小干扰稳定性的CSCR指标(如图中所标注的 $A_1\sim D_1$ 点)和考虑交流母线电压安全运行约束(0.95 (标么值) $<U_i<1.05$ (标么值))的临界运行短路比COSCR指标(如图中标注的 $A_2\sim D_2$ 点),对比2种不同临界短路比可知,在相同交流系统工况下,COSCR指标要高于CSCR,即考虑电压安全运行约束条件后,VSC-HVDC的安全稳定运行裕度有所减小。

图5给出了不同等值阻抗角下逆变及整流工作状态下VSC-HVDC的CSCR与COSCR指标的变化曲线。从图5可知,CSCR与COSCR指标随交流系统等值阻抗的变化趋势一致,但COSCR指标对VSC-HVDC系统安全稳定裕度的评估相比CSCR更为严苛(COSCR具有更大的数值)。

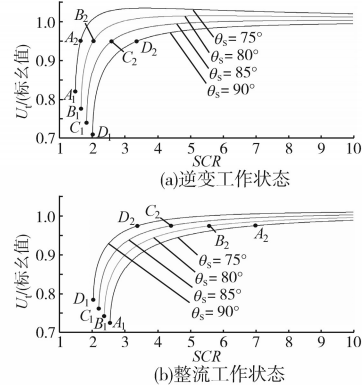


图4 等值阻抗角变化时 U_i 与SCR的特性曲线

Fig. 4 Characteristics curves of U_i and SCR with varying equivalent impedance angle

整流工作状态下,随着等值阻抗角的增大,两者之间的差值逐渐减小;逆变工作状态下,随着等值阻抗角的减小,两者差值逐渐减小。

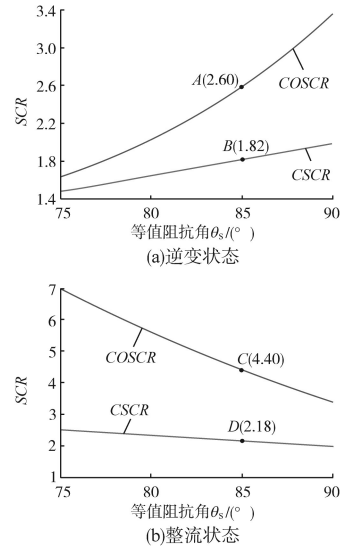


图5 不同等值阻抗角下CSCR与COSCR指标的变化曲线

Fig. 5 Change curves of CSCR and COSCR indexes with varying equivalent impedance angle

2.2 无功功率运行点的影响

交流系统阻抗角 $\theta_s=85^\circ$,整流和逆变工作状态下,保持VSC-HVDC输出的有功功率为额定值,并改变无功功率分别为 $-0.5, 0.0, 0.5$ (标么值),根据式(8)计算得到系统根轨迹如图6所示。根据图6可知VSC-HVDC无功功率运行点对系统小干扰稳定性影响显著。随着VSC向交流系统输出无功功率的增大,无论是整流或逆变工作状态下,VSC-HVDC能够保持稳定运行的CSCR指标值逐渐减小;而随着VSC从交流系统吸收无功功率的增大,整流和逆变工作模式下相应的CSCR指标值逐渐增大。

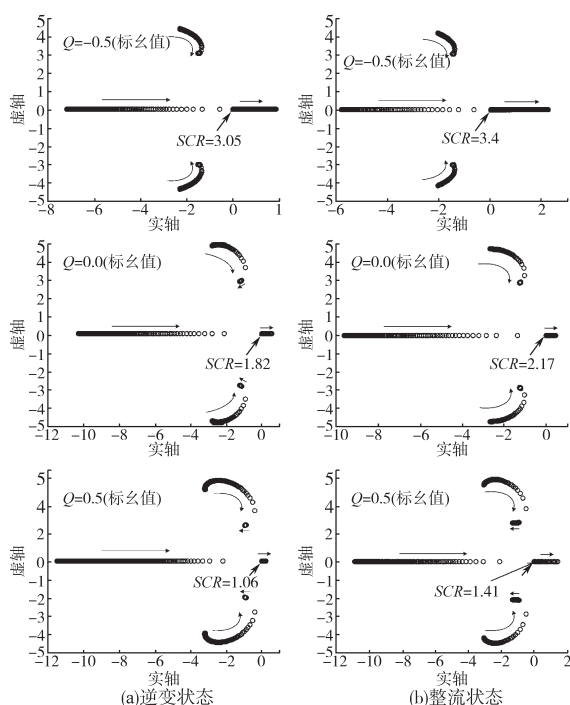


图6 不同无功功率运行点的VSC-HVDC系统特征值轨迹

Fig. 6 Eigenvalue locus of VSC-HVDC system with different reactive power operating points

图7为在不同VSC-HVDC无功运行范围内,考虑电压安全运行约束的交流母线电压 U_i 与交流系统SCR的变化曲线。从图7中可知,随着VSC向交流系统输出无功功率的增大,CSCR(在图中标注为 $A_1 \sim E_1$ 点)和COSCR指标(在图中标注为 $A_2 \sim E_2$ 点)逐渐减小,两者之间的差值逐渐减小,当VSC输出的无功功率足以满足交流母线电压运行在允许的安全范围之内时,2个指标相互重合(如图7中的A点);随着VSC从交流系统吸收功率的增大,CSCR与COSCR指标的变化趋势与之相反。

根据图7得到不同无功功率运行点下VSC-HVDC系统的CSCR与COSCR指标变化趋势如图8所示。从图8可知,相同无功功率运行点下,VSC-HVDC运行在整流状态较逆变模式时具有更大的CSCR与COSCR指标值,这与2.1小节的分析结论一致;随着VSC向交流系统提供无功功率的增加,CSCR与COSCR指标值的差异逐渐减小,而当VSC向交流系统吸收功率的提升,两者之间的差异显著增加。因此,在VSC允许输出的容量范围之内,提高VSC-HVDC对交流系统的无功功率支撑,能够在一定程度上提升VSC-HVDC的稳定运行裕度。

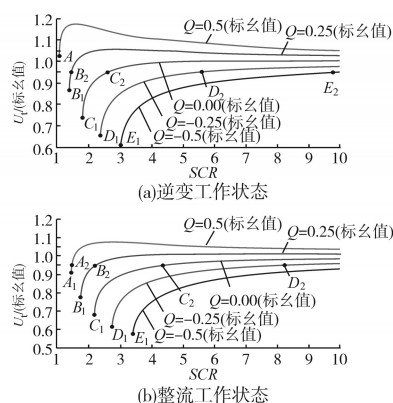
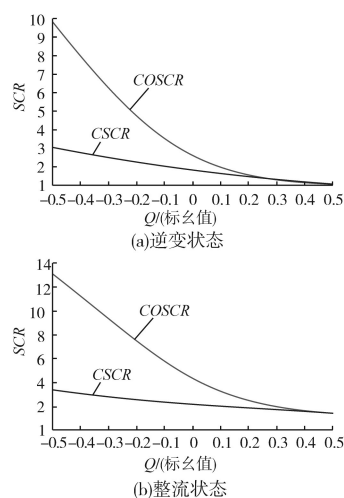
图7 无功功率变化时 U_i 与SCR的特性Fig. 7 Characteristics of U_i and SCR with varying reactive power operating points

图8 不同无功功率下CSCR与COSCR指标变化曲线

Fig. 8 Change curves of CSCR and COSCR indexes with varying reactive power operating points

3 仿真验证

为了验证本文分析结论的正确性,基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建如图9所示的VSC-HVDC详细电磁暂态仿真模型,通过改变交流侧电网模型的线路的长度及网架结构可模拟等效改变交流系统等值阻抗 $Z_s \angle \theta_s$ 和短路比SCR。

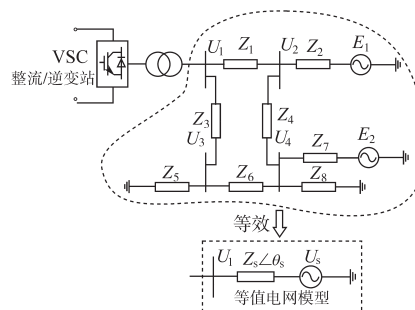


图9 VSC-HVDC系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of VSC-HVDC system

对应图5所示VSC-HVDC不同运行工况下的CSCR与COSCR指标趋势曲线,当交流系统等值阻抗角 $\theta_s = 85^\circ$,有功功率和无功功率设定值 $P_{\text{ref}} = \pm 1.0$ (标么值)(整流为-,逆变为+), $Q_{\text{ref}} = 0$ (标么值)工况下,设置4组不同案例验证理论计算所得CSCR与COSCR指标值的准确性,相应VSC-HVDC系统仿真波形如图10所示。

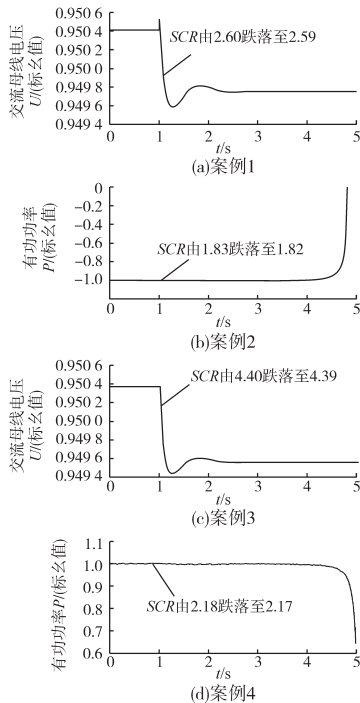


图10 VSC-HVDC交流系统SCR阶跃特性

Fig.10 Response of VSC-HVDC for AC system SCR step-change

图10中,案例1为阻抗角 85° ,VSC运行于逆变站状态下的COSCR验证;案例2为阻抗角 85° ,VSC运行于逆变站状态下的CSCR验证;案例3为阻抗角 85° ,VSC运行于整流站状态下的COSCR验证;案例4为阻抗角 85° ,VSC运行于整流站状态下的CSCR验证。

图10a为VSC运行在逆变站状态下,1.0 s时由于交流系统网架结构发生变化,等效SCR由2.60跌落至2.15时的VSC交流母线电压,此时交流母线电压跌落至0.95(标么值)以下,不再满足电压安全运行约束条件,由此得到的COSCR值与图5a中A点(2.60)相符;图10b为VSC运行在逆变站状态下,1.0 s时交流系统等效SCR由1.83跌落至1.82时的VSC有功功率仿真波形,从图中可看出VSC输出有功功率逐渐失稳,这与图5a中B点(1.83)一致;同理,根据图10c~图10d仿真分析所得到的CSCR和COSCR值与图5b中的C、D点理论计算值相差很小,从而验证了本文基

于小干扰稳定性分析和安全运行约束条件所得结论的有效性。

4 结论

本文建立了基于P-Q控制模式的VSC-HVDC系统的小干扰动态模型,对比研究了交流系统及无功功率运行点对运行于整流和逆变工作状态的VSC-HVDC系统小干扰稳定性的影响,得到如下结论:

1)交流系统的等值阻抗角对运行在整流和逆变工作状态下的VSC-HVDC系统的小干扰稳定性影响显著,当VSC工作于整流(逆变)状态时,随着等值阻抗角的增大(减小),维持VSC-HVDC系统小干扰稳定所需的CSCR值越小(越大),即系统的稳定裕度越高;

2)整流和逆变工作状态下,在VSC容量允许范围之内提升其向交流系统输出的无功功率能够显著提升系统的小干扰稳定性,CSCR值越小,系统稳定裕度越高。

3)提出了一种综合考虑VSC-HVDC系统小干扰稳定和电压安全运行约束条件的临界运行短路比COSCR指标,可定量评估VSC-HVDC系统的稳定运行裕度;

4)考虑电压安全运行约束条件后得到的COSCR值在不同运行点下相较相同工况下的CSCR值有所增大,即考虑电压安全运行条件后减小了VSC-HVDC系统的稳定运行裕度;且随着VSC向交流系统提供无功功率的增加,两者差值逐渐减小,即当VSC-HVDC系统有额外的无功支撑时,电压安全运行约束条件将不再影响VSC-HVDC系统的稳定运行裕度。

参考文献

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [3] 戚庆茹,蒋维勇,刘建琴,等. 基于柔性直流输电技术的高压直流送端孤岛系统黑启动方法[J]. 电力建设, 2017, 38(10): 138-144.
- [4] Zhou J Z, Ding H, Fan S, et al. Impact of Short-circuit Ratio and Phase-locked-loop Parameters on the Small-signal Behavior of a VSC-HVDC Converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.

(下转第64页)

复速度,维持直流电压恒定。

基于 Matlab/Simulink 搭建四端 VSC-MTDC 仿真模型,验证提出的改进下垂控制的运行效果。系统在发生潮流反转、主/从站退出运行等功率突变的情况下,改进下垂控制策略可以有效地抑制直流电压的陡增或跌落,并以相对较快的速度进行功率平衡,从而提高系统运行的稳定性,满足系统 $N-1$ 法则。

参考文献

- [1] 赵巧玲. VSC-MTDC 故障穿越及协调控制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [2] 赵学深, 彭克, 张新慧, 等. 多端柔性直流配电系统下垂控制动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 89-101.
- [3] 成龙, 金国彬, 王利猛, 等. 考虑功率裕度和电压偏差的多端直流配电网自组织下垂控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 81-89.
- [4] 邵俊人, 陈思奇. 直流电压系统自适应下垂控制[J]. 云南电力技术, 2018, 46(4): 27-31.
- [5] 陈朋, 李梅航, 严兵, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的通用控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 47-52.
- [6] 李海峰, 刘崇茹, 李庚银, 等. 适用于柔性高压直流输电网的直流电压下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21):

40-46.

- [7] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2588-2599.
- [8] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 P-V 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 408-415.
- [9] 陈继开, 董飞飞, 王振浩, 等. 适用于功率波动的多端柔性直流系统改进下垂控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3708-3717.
- [10] 米根锁, 湛杰, 高磊, 等. VSC-MTDC 系统下垂控制优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 101-107.
- [11] 陈大鹏, 陈朋, 李梅航, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的优化下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 194-199.
- [12] 王炜宇, 李勇, 曹一家, 等. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统自适应下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 142-149.
- [13] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 40-48.
- [14] 陈朋, 李梅航, 严兵, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的灵活下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3433-3440.

收稿日期: 2020-03-26

修改稿日期: 2020-05-06

(上接第 58 页)

- [5] Li T, Gole A M, Zhao C. Harmonic Instability in MMC-HVDC Converters Resulting from Internal Dynamics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1738-1747.
- [6] 黄云辉, 周翩, 王龙飞. 弱电网下基于矢量控制的并网变换器功率控制稳定性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 93-99.
- [7] 吴广禄, 周孝信, 李亚楼, 等. 弱交流电网条件下 VSC-HVDC 改进矢量控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4577-4590.
- [8] Guo C, Liu W, Zhao C, *et al.* A Frequency-based Synchronization Approach for the VSC-HVDC Station Connected to a

Weak AC Grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1460-1470.

- [9] 王烨, 宁琳如, 赵成勇, 等. VSC-HVDC 联接弱交流系统下的新型附加频率阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2989-2998.
- [10] 吴广禄, 周孝信, 王姗姗, 等. 柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理解析研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2622-2633.

收稿日期: 2018-08-09

修改稿日期: 2018-10-01