

弱并网条件下VSC的自适应型虚拟并网点规划与控制策略

靳丹¹, 陟晶¹, 辛世金¹, 杨建¹, 黄亚飞², 徐清¹

(1. 国网白银供电公司, 甘肃 白银 730900; 2. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要:电压源换流器(VSC)接入薄弱交流电网时存在系统小扰动稳定性问题,传统控制策略下VSC不得降低输出功率以维持稳定运行。为提升弱并网VSC的小扰动稳定性,首先基于交流电压外环建立了弱并网VSC稳定性机理的通用分析模型,分析了锁相环(PLL)与VSC外环控制间的耦合特性,及其对系统小扰动稳定性的影响机理。在此基础上,提出了一种参数自适应型虚拟并网点控制策略。在PSCAD/EMTDC环境下搭建的弱并网VSC详细开关模型验证了所提控制方法的有效性。

关键词:电压源换流器;弱交流电网;小扰动稳定性;改进控制策略

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24738

Adaptive Virtual Access Point Planning and Control Strategy of VSC Under Weak Network Connection

JIN Dan¹, ZHI Jing¹, XIN Shijin¹, YANG Jian¹, HUANG Yafei², XU Qing¹

(1. State Grid Baiyin Power Supply Company, Baiyin 730900, Gansu, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Voltage source converter (VSC) connected to weak AC power grid has the risk of small disturbance instability. Under the traditional control strategy, VSC has to reduce output power to maintain stable operation. In order to improve the stability of the weak grid connected VSC system, first established a universal analysis model for revealing the stability mechanism of weak grid connected VSC based on the AC voltage outer loop, and revealed the influence of the coupling characteristics among the phaselocked loop (PLL) and the VSC outer loop control on system stability. On this basis, a parameter adaptive control strategy for virtual parallel point was proposed. The detailed switch model of VSC in the PSCAD/EMTDC environment verifies the effectiveness of the proposed control method.

Key words: voltage source converter (VSC); weak AC power grid; small disturbance stability; improved control strategy

实现可再生能源的大规模并网发电是解决近年来日益严峻的能源短缺及环境污染问题、实现“碳中和、碳达峰”的必然举措^[1-2]。电压源换流器(voltage source converter, VSC)具有有功-无功四象限运行,控制方式灵活多样等特点,因此被广泛应用于可再生电源的并网接口^[3-4]。然而可再生能源发电场站或大规模分布式电源的集中并网点通常远离负荷中心,在可再生能源发电消纳的过程中,不可避免地出现接口VSC经长距离交流线路接入负荷中心电网的运行场景,过高的等效阻抗将导致VSC与交流电网间的连接强度

变得薄弱^[5-7]。

大量国内外研究结果及实际系统的运行情况表明,电网强度过低时,VSC运行的小扰动稳定性将显著下降,因此,为保证系统安全稳定运行,弱网环境下的VSC不得不降低其输出功率^[8-9]。为提升弱并网VSC的运行小扰动稳定性,现有研究工作围绕弱并网VSC小扰动稳定性下降的机理展开理论分析,同时提出了适用于弱并网VSC的小扰动稳定性提升控制方法。

在弱并网VSC小扰动稳定性机理分析方面,文献[10]建立了矢量控制模式下的弱并网VSC详

细状态空间模型,描绘了交流电网由强到弱时系统的特征值变化,并指出弱网环境下,VSC输出功率过高时,系统会出现低频率的振荡现象,严重时将导致失稳。文献[11]以直流电压控制模式下的弱并网VSC为研究对象,通过特征值分析指出,直流电压外环的带宽接近锁相环(phase locked loop, PLL)带宽时,弱并网VSC系统的小扰动稳定性将显著下降。文献[12]基于状态空间模型,分析了弱并网VSC的交流电压外环对系统小扰动稳定性的影响,结果表明交流电压外环带宽过低时将导致系统稳定裕度下降,VSC输出功率上限减小。基于阻抗分析模型,文献[13]指出在弱交流电网环境下,随着VSC输出功率的升高,系统将呈现出受PLL带宽影响的负电阻特性,随着PLL带宽升高,负电阻特性将愈发明显。然而上述分析所得出的结果均只针对某一控制环节的影响,并未考虑多控制环节间的耦合特性对于系统小扰动稳定性的影响。

文献[14]指出,随着交流电网强度的下降,VSC外环与PLL的耦合程度将显著提升,其交互特性对系统小扰动稳定性影响显著。为分析VSC外环与PLL的耦合交互对系统小扰动稳定性的影响,文献[15]以有功外环为基本环节,将PLL及交流电压外环作为有功外环的调制传递函数,分析了电网强度减弱时,PLL与交流电压外环对有功控制的影响。文献[16]建立了一种适用于弱并网VSC系统小扰动稳定性分析的阻尼-恢复转矩模型,该模型基于直流电压控制环节建立基本的二阶阻尼-恢复转矩模型,将PLL与交流电压控制表示为附加转矩,用以揭示弱网条件下控制环节耦合对系统小扰动稳定性的影响。该文献指出,交流电压控制将对直流电压控制产生一个附加的负转矩,不利于系统稳定。然而上述模型均依赖于一个特定的控制环节,对于其它控制形式不具备通用性。

从小扰动稳定的性质来讲,VSC输送功率的约束有两种:一是系统理论功率传输极限(后简称“理论极限”),即潮流有解性约束;二是满足系统小扰动稳定的运行边界,即计及控制系统动态时的VSC输出功率上限(后简称“功率上限”)[17]。强网条件下,VSC的功率上限无限接近理论极限,然而由于弱网条件下,VSC控制环节的耦合特性明显,其交互作用将使VSC功率上限减小[18]。因此从稳定性质来讲,现有文献中所提及的VSC

稳定性提升控制策略亦可具体分为两类:一类为通过优化控制器设计或控制参数选取,以降低控制环节间的耦合,使得弱并网VSC的功率上限更接近理论极限;另一类是通过调整系统关键电气量,直接提升VSC功率理论极限。

第一类方法中,文献[19]分析指出,弱网环境下VSC无功电流与输出功率间的耦合呈现非线性。基于此该文献设计了一种有功-电流补偿控制,实现了有功功率波动时对电压波动的快速抑制,提升了系统稳定性。文献[20]指出弱网条件下并网点电压受VSC功率动态影响严重,该文献进而提出了一种基于 H_{∞} 固定结构的改进矢量电流控制方法,提高了有功功率和交流电压控制的稳定性。文献[21]提出了一种附加频率阻尼控制策略,该策略基于PLL的输出频率,为VSC的有功侧外环提供功率补偿,使得VSC的功率上限更接近其理论极限。文献[22]提出了一种电压阻尼控制方式,该策略在PLL与交流电压外环间设计了一个补偿路径,用以减轻弱网环境下上述两者间的耦合作用。

在第二类方法中,文献[23]分析指出,提高交流线路的阻抗比能够提升VSC的理论功率极限,进而提出了一种在电压调制处增加虚拟电阻来提升VSC输送功率极限的控制方法。文献[24]设计了一种基于输出功率的交流电压补偿控制方法,即通过VSC的功率输出值,修改交流电压外环的电压参考值,起到升高并网点电压的目的,从而提高VSC功率理论极限。文献[25]提出了一种虚拟并网点的控制方式,该方法基于并网点的采样电气量,计算出一个更靠近交流系统的虚拟并网点,以减小VSC与交流电网间的等效阻抗,进而提高VSC的理论功率极限。然而上述方法均忽略了一个关键因素,即在调整并网点电压稳态值及电网等效阻抗时,控制环节的带宽会相应地发生改变,这可能会导致控制环节间的交互作用增强,反而造成弱并网VSC的稳定性下降。

围绕弱并网VSC系统的小扰动稳定性机理分析和稳定性提升方面,本文的主要创新工作如下:首先,提出了一种弱并网VSC小扰动稳定性机理分析模型,与现有文献相比,该模型清晰揭示了控制环节耦合特性对弱并网VSC稳定性的影响机理——即VSC有功外环、交流电压外环及PLL三者间任意两者的带宽相互接近时,系统稳定性明显减弱;此外,本文所提出控制方

法对于不同有功侧外环控制的弱并网VSC具有良好的通用性;在此基础上,本文提出了一种控制参数自适应型虚拟并网点控制策略,以提升弱并网VSC的输出功率上限。基于PSCAD的详细开关模型仿真验证了所提控制策略的有效性。

1 弱并网VSC系统建模

本节首先介绍了矢量控制策略下的弱并网VSC系统,再在此基础上推导出了系统的小扰动稳定性分析模型,为后文的弱并网VSC系统的稳定机理分析奠定基础。

1.1 矢量控制策略下的弱并网VSC系统

图1给出了经典矢量控制策略下的弱并网VSC系统的拓扑结构图。VSC经LCL滤波装置接入交流电网,其中 C_f 为滤波电容, L_{f1} , L_{f2} 分别为VSC侧及电网侧的滤波电感。弱交流电网用串联等效电抗 L_g 的无穷大电源表示,等效阻抗($X_g=2\pi f L_g$)的取值决定了交流电网的强度。 $E\angle\delta$, $V_t\angle\theta$ 及 $V_s\angle 0$ 分别为VSC端口、并网点及无穷大交流电网的电压相量。

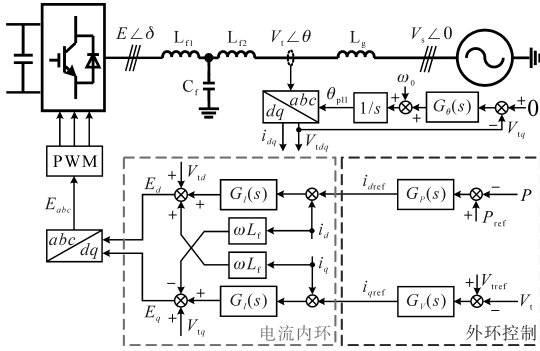


图1 VSC并网拓扑结构及矢量控制系统

Fig.1 VSC grid-connected topology and vector control system

各交流电压相量间的关系如下式所示:

$$\begin{cases} V_t\angle\theta = V_s\angle 0 + jX_g I_t \\ E\angle\delta = V_t\angle\theta + j(X_{f1} I_f + X_{f2} I_t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $X_{f1}=2\pi f L_{f1}$ $X_{f2}=2\pi f L_{f2}$
式中: I_t 为VSC在并网点注入的电流相量; I_f 为流经 L_{f1} 的电流相量。

经典矢量控制采用基于PLL同步的内外环控制结构。其中外环用于控制VSC并网点的电气量,并生成内环控制所需的参考值,内环实现电流追踪,并为脉冲宽度调制(PWM)环节提供电压波形。VSC外环控制灵活多样,可根据具体控制目标进行控制器设计和控制目标选取,本文中有功侧、无功侧外环的控制分别选取有功功率控

制和交流电压控制,如下式所示:

$$\begin{cases} i_{dref} = G_p(s)(P_{ref} - P) \\ i_{qref} = G_v(s)(V_{tref} - V_t) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $G_p(s)=k_{pP}+k_{iP}/s$ $G_v(s)=k_{pV}+k_{iV}/s$
式中: $G_p(s)$, $G_v(s)$ 分别为有功外环和交流电压外环的比例-积分(PI)控制环节; k_{pP} , k_{iP} 分别为有功外环PI控制的比例、积分系数; k_{pV} , k_{iV} 分别为交流电压外环PI控制的比例、积分系数; s 为微分算子; i_{dref} , i_{qref} 分别为有功外环和交流电压外环生成的内环电流参考值; P 为VSC输出的有功功率; V_t 为并网点电压;下角标“_{ref}”表示电气量所对应的参考值。

电流内环的具体表达式如下式所示:

$$\begin{cases} E_d = V_{td} + G_i(s)(i_{dref} - i_d) + \omega L_f i_q \\ E_q = V_{tq} + G_i(s)(i_{qref} - i_q) - \omega L_f i_d \end{cases} \quad (3)$$

其中 $G_i(s)=k_{pI}+k_{iI}/s$
式中: i_d , i_q 分别为VSC输出电流的 d , q 轴分量; V_{td} , V_{tq} 分别为并网点电压的 d , q 轴分量; E_d , E_q 分别为VSC端口电压的 d , q 轴分量; ω 为PLL同步频率; $G_i(s)$ 为电流内环的PI控制环节; k_{pI} , k_{iI} 分别为电流内环PI控制的比例、积分系数。

PLL用于追踪并网点的电压相位,实现VSC与交流电网的同步运行,其表达式如下式所示:

$$\theta_{pll} = \frac{1}{s} [\omega_0 - G_\theta(s)V_{tq}] \quad (4)$$

其中 $G_\theta(s)=k_{p\theta}+k_{i\theta}/s$
式中: θ_{pll} 为PLL的输出相角; ω_0 为交流系统的额定频率; $G_\theta(s)$ 为PLL的PI控制环节; $k_{p\theta}$, $k_{i\theta}$ 分别为PLL的PI控制的比例、积分系数。

综上,得到了矢量控制策略下弱并网VSC系统的基本模型。

1.2 弱并网VSC系统的稳定性机理分析模型

基于上一小节所建立的弱并网VSC模型,可推导出弱并网VSC系统的小信号模型。详细的推导过程如下文。

系统的坐标系如图2所示,其中 D - Q 坐标系始终与交流无穷大电网保持同相位, d - q 坐标系则为PLL提供同步坐标系。稳态时并网点电压相角为 θ ,PLL的输出相角 θ_{pll} 与其相同,而当系统出现扰动时,并网点电压相角产生 $\Delta\theta$ 的波动,PLL通过其PI控制自动追踪并网点电压相角,产生 $\Delta\theta_{pll}$ 。因此在建模过程中,交流系统在 D - Q 坐标系下建模,而VSC依赖PLL进行同步,其控制系统在 d - q 坐标系下建模。

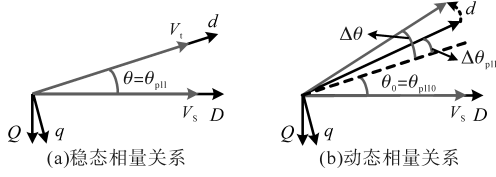


图2 旋转坐标系及 PLL 动态

Fig.2 Rotation coordinate system and PLL dynamics

d - q , D - Q 两坐标系下的电气量转换关系如下式所示:

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{pll} & \sin\theta_{pll} \\ -\sin\theta_{pll} & \cos\theta_{pll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: x 可表示交流系统的电压或电流。

考虑到实际系统中, LCL 滤波器的滤波电容非常小, 因此可不计及其对 VSC 输出电流的影响, 即认为 $I_t = I_i$ 。再结合式(5), 可将式(1)表示为 d - q 参考系下的线性化形式, 如下两式所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_d \\ \Delta E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_{td} \\ \Delta V_{tq} \end{bmatrix} + sL_f \begin{bmatrix} \Delta i_{td} \\ \Delta i_{tq} \end{bmatrix} + \omega L_f \begin{bmatrix} \Delta i_{tq} \\ -\Delta i_{td} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{td} \\ \Delta V_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_{sd} \\ \Delta V_{sq} \end{bmatrix} + sL_g \begin{bmatrix} \Delta i_{td} \\ \Delta i_{tq} \end{bmatrix} + \omega L_g \begin{bmatrix} \Delta i_{tq} \\ -\Delta i_{td} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{sd} \\ \Delta V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_{s0} \sin\theta_0 \\ V_{s0} \cos\theta_0 \end{bmatrix} \Delta\theta_{pll} \quad (8)$$

文中式(2)、式(3)所示的 VSC 内外环控制的线性化形式分别如下两式所示:

$$\begin{cases} \Delta i_{dref} = G_P(s)(\Delta P_{ref} - \Delta P) \\ \Delta i_{qref} = G_V(s)(\Delta V_{tref} - \Delta V_t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \Delta E_d = \Delta V_{td} + G_I(s)(\Delta i_{dref} - \Delta i_d) + \omega L_f \Delta i_q \\ \Delta E_q = \Delta V_{tq} + G_I(s)(\Delta i_{qref} - \Delta i_q) - \omega L_f \Delta i_d \end{cases} \quad (10)$$

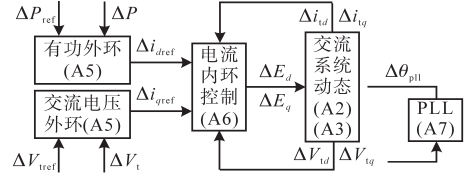
由图 2 可得 PLL 动态如下式所示:

$$\Delta\theta_{pll} = -\frac{1}{s} G_\theta(s) \Delta V_{tq} \quad (11)$$

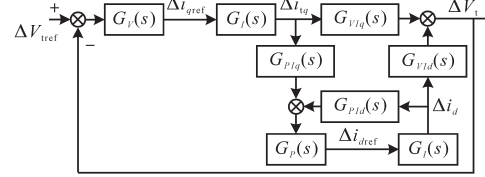
基于式(5)~式(11), 可得弱并网 VSC 的小扰动稳定性分析模型如图 3a 所示。

现有研究文献指出, 弱交流电网条件下, 无功侧外环采用交流电压控制的 VSC 比采用无功功率控制时稳定性更强^[26]。而有功侧外环则需要根据实际控制需求灵活选取, 因此文献[15]中基于有功侧外环建立的稳定性分析模型, 其通用性必然较差。为此, 本文基于交流电压控制环节, 建立了一种具有良好通用性的弱并网 VSC 稳定性机理分析模型, 如图 3b 所示。

基于式(6)、式(10)可得内环电流参考值到 VSC 输出电流的传递函数 $G_{ii}(s)$, 如下式所示:



(a) 弱并网 VSC 系统小信号模型



(b) 弱并网 VSC 系统稳定性机理分析模型

图3 弱并网 VSC 稳定性分析模型

Fig.3 Stability analysis model of weak grid tied VSC

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{td} \\ \Delta i_{tq} \end{bmatrix} = G_{ii}(s) \begin{bmatrix} \Delta i_{dref} \\ \Delta i_{qref} \end{bmatrix} = \frac{sk_{pi} + k_{ii}}{s^2 L_f + sk_{pi} + k_{ii}} \begin{bmatrix} \Delta i_{dref} \\ \Delta i_{qref} \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(8)、式(11)代入式(7), 可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{td} \\ \Delta V_{tq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL_s - \frac{\omega L_s V_{s0} \sin\theta_0 G_\theta(s)}{1 + V_{s0} \cos\theta_0 G_\theta(s)} & \frac{sL_s V_{s0} \sin\theta_0 G_\theta(s)}{1 + V_{s0} \cos\theta_0 G_\theta(s)} \\ -\frac{\omega L_s}{1 + V_{s0} \cos\theta_0 G_\theta(s)} & \frac{sL_s}{1 + V_{s0} \cos\theta_0 G_\theta(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{td} \\ \Delta i_{tq} \end{bmatrix} \quad (13)$$

VSC 外环输入量 ΔP , ΔV_t 可由下式求得:

$$\begin{cases} \Delta P = V_{td0} \Delta i_{td} + V_{tq0} \Delta i_{tq} + i_{td0} \Delta V_{td} + i_{tq0} \Delta V_{tq} \\ \Delta V_t = \cos\theta_0 \Delta V_{td} - \sin\theta_0 \Delta V_{tq} \end{cases} \quad (14)$$

将式(13)代入式(14), 可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta V_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{Pld}(s) & G_{Pliq}(s) \\ G_{Vld}(s) & G_{Vliq}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{td} \\ \Delta i_{tq} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} G_{Pld}(s) = V_{td0} + sL_s i_{td0} - \omega L_s \frac{i_{td0} V_{s0} \sin\theta_{pll0} G_\theta(s) + i_{tq0}}{1 + V_{s0} \cos\theta_{pll0} G_\theta(s)} \\ G_{Pliq}(s) = V_{tq0} + \omega L_s i_{td0} + sL_s \frac{i_{td0} V_{s0} \sin\theta_{pll0} G_\theta(s) + i_{tq0}}{1 + V_{s0} \cos\theta_{pll0} G_\theta(s)} \\ G_{Vld}(s) = sL_s - \frac{\omega L_s V_{s0} \sin\theta_{pll0} G_\theta(s)}{1 + V_{s0} \cos\theta_{pll0} G_\theta(s)} \\ G_{Vliq}(s) = \omega L_s + \frac{sL_s V_{s0} \sin\theta_{pll0} G_\theta(s)}{1 + V_{s0} \cos\theta_{pll0} G_\theta(s)} \end{cases} \quad (16)$$

为验证上述推导过程的正确性, 参考酒泉地区实际 VSC 并网系统的相关参数, 在 PSCAD 仿真环境下搭建了矢量控制策略下的弱并网 VSC 的详细电磁暂态仿真模型, 仿真模型的具体参数如表 1 所示。

基于上述仿真系统, 分别进行有功功率、交流电压阶跃的对比验证。如图 4a 所示, 在 $t=0.5$ s

表1 仿真系统参数

Tab.1 Parameters of simulation system		
参数类型	具体参数名称	参数值
电气量 基准参数	VSC额定功率 P_B	30 MW
	额定交流电压 V_s (有效值)	35 kV
	交流频率 f_B	50 Hz
控制系统 参数	有功功率外环PI参数 k_{pi}/k_{ip}	0.2/4
	交流电压外环PI参数 k_{pv}/k_{iv}	0.2/8
	PLL环节PI参数 $k_{p\theta}/k_{i\theta}$	4/20
	电流内环PI参数 k_{pi}/k_{id}	10/100
VSC 器件参数	开关频率 f_k	10 kHz
	LCL滤波器参数 $L_{t1}/C_t/L_{t2}$	11.7 mH/1 μ F/0.6 mH
	交流系统线路电感 L_g	130 mH

令有功外环参考 P_{ref} 由0.8(标么值)阶跃至0.85(标么值),再在 $t=3$ s时阶跃回0.8(标么值),可见弱并网VSC稳定性机理分析模型与开关模型的暂稳态特性保持一致。图4b给出了交流电压阶跃的对比结果,在 $t=0.5$ s令交流电压参考 V_{tref} 由1(标么值)阶跃至0.95(标么值),再在 $t=3$ s时阶跃回1(标么值),两模型的对比结果一致,上述仿真结果验证了本节中模型推导的正确性。

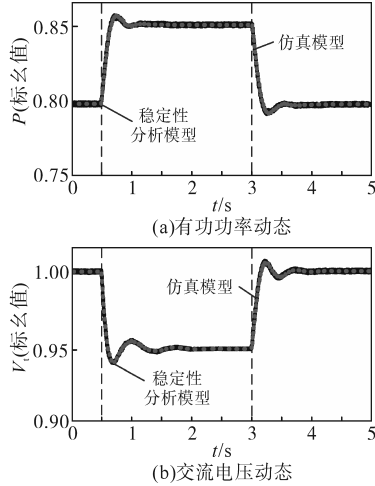


图4 弱并网VSC稳定性分析模型验证结果

Fig.4 Validation results of weak grid-connected VSC stability analysis model

2 弱并网VSC稳定性机理分析

随着 L_g 逐渐增大, $G_{pid}(s)$, $G_{piq}(s)$, $G_{vid}(s)$ 及 $G_{viq}(s)$ 将不再为零,这表明控制环节间将出现耦合。记 Δi_{qref} 到 ΔV_i 的传递函数为 $H(s)$,可见系统的开环传递函数部分由 $G_v(s)$ 和 $H(s)$ 串联组成。图5给出了不同交流电网强度下,开环传递函数的Bode图。其中 SCR 取值为1.2,1.5,2时系统均稳定, $SCR=1$ 为失稳工况。

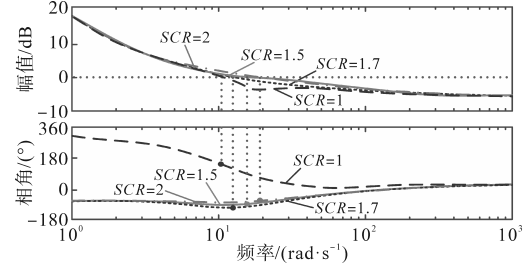


图5 不同电网强度下Bode图

Fig.5 Bode diagram under different grid strengths

由图5可见, SCR 为1,1.5,1.7,2时,开环传递函数的相位分别约为 160° , -110° , -100° , -90° 。考虑到 $SCR=1$ 时系统为非最小相位系统,因此上述4个工况在修正后的相位裕度分别为: -20° , 70° , 80° , 90° 。这表明随着电网强度的减弱, $H(s)$ 的相位滞后程度将愈发明显,当系统 SCR 过低时,相位裕度将小于0,系统失稳。

下面分析控制环节间的耦合特性对弱并网VSC系统稳定性的影响。控制环节间存在耦合的必要条件时控制环节的响应速度在相近的时间尺度内。而判断控制环节响应速度的依据则是控制环节的带宽。PLL、有功外环、交流电压外环的带宽计算方式如下:

PLL的闭环传递函数为

$$G_{\theta_c}(s) = \frac{k_{ppll}s + k_{ipll}}{s^2 + k_{ppll}s + k_{ipll}} \quad (17)$$

有功功率的稳态表示如下式所示:

$$P = V_{td}i_{td} + V_{tq}i_{tq} \quad (18)$$

交流线路电气量的稳态关系可表示为

$$V_{td} = V_{sd} + \omega L_g i_{tq} \quad (19)$$

考虑到稳定条件下及小扰动条件下 V_{td} 非常小,因此满足 $V_{td} \approx V_i$,进而可得有功功率外环及交流电压外环的闭环传递函数如图6a、图6b所示,其数学表达式分别如下式所示:

$$G_{P_c}(s) = \frac{V_{sd}G_P(s)G_{II}(s)}{1 + V_{sd}G_P(s)G_{II}(s)} \quad (20)$$

$$G_{V_c}(s) = \frac{X_g G_V(s)G_{II}(s)}{1 + X_g G_V(s)G_{II}(s)} \quad (21)$$

式中: $G_{P_c}(s)$, $G_{V_c}(s)$ 分别为有功、交流电压外环的闭环传递函数。

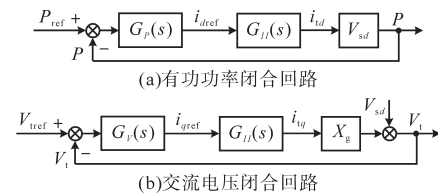


图6 外环闭环传递函数

Fig.6 Closed loop transfer function of outer loop

按下式求解式(17)、式(20)及式(21),可得相应的带宽频率:

$$20\lg(|G_c(j\omega)|) = -3\text{ dB} \quad (22)$$

式中: $G_c(s)$ 可表示 $G_{\theta_c}(s)$, $G_{P_c}(s)$ 或 $G_{V_c}(s)$ 。

基于上述带宽求解方法,图7给出了取有功外环带宽 $\omega_p=15\text{ Hz}$,交流电压外环带宽 $\omega_v=10\text{ Hz}$ 时,不同 PLL 带宽条件下 $H(s)$ 的 Bode 图。

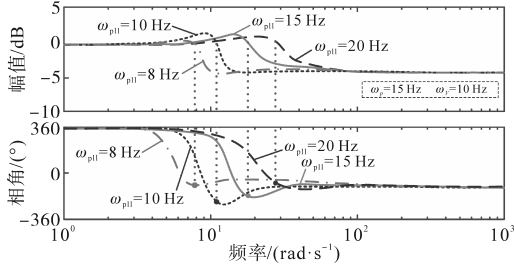


图7 PLL带宽变化时 $H(s)$ 的 Bode 图

Fig.7 Bode diagram of $H(s)$ when PLL bandwidth changes

由图7可见,当 PLL 带宽 ω_{PLL} 接近有功外环或交流电压外环时, $H(s)$ 的相角出现明显滞后,此时系统的稳定性将显著下降。

图8给出了交流电压外环带宽 $\omega_v=15\text{ Hz}$, PLL 带宽 $\omega_{\text{PLL}}=10\text{ Hz}$ 时,不同有功外环带宽条件下, $H(s)$ 的 Bode 图。由图8可见,当有功外环带宽 ω_p 接近 PLL 或交流电压外环时, $H(s)$ 的幅值裕度将明显下降,因此系统稳定性将显著下降。综合上述分析可见, PLL、有功外环及交流电压外环三个控制环节中,任意两者带宽接近时,系统稳定裕度都将明显降低,导致弱并网 VSC 系统稳定性恶化。值得说明的是,现有文献中得出的结论均为系统处于某一特定工况下的分析结果,如文献[12]所提及的交流电压带宽降低时系统稳定性减弱,该文献的初始工况为 PLL 带宽低于交流电压外环带宽,因此降低交流电压外环将使得两者带宽接近,造成稳定性减弱。

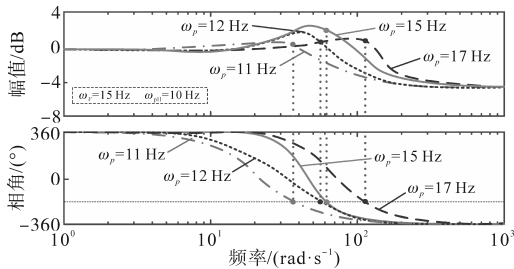


图8 有功外环带宽变化时 $H(s)$ 的 Bode 图

Fig.8 Bode diagram of $H(s)$ when P outer loop bandwidth changes

3 自适应型虚拟并网点控制策略

现有的改进控制策略主要分为两大类,第一

类通过优化控制器设计或参数选取,使 VSC 的功率上限更接近理论极限。采用此类方法时,系统稳定性提升有限,因为 VSC 功率的物理约束并未提升。而第二类则是通过调整系统关键电气量,直接提升 VSC 功率理论极限。因此,基于理论分析得出的结论,本节采用第二类方法的思路,提出一种控制参数自适应的虚拟并网点控制策略,以提升弱并网 VSC 系统的稳定性。其具体实现方法分为:1)基于实际并网点求取虚拟并网点相关电气量;2)根据虚拟并网点位置优化控制参数。

3.1 虚拟并网点电气量求取

参考图1,相较于实际并网点而言,虚拟并网点的位置应更靠近交流电网。记实际并网点与虚拟并网点间的线路电感为 L_Δ ,则基于实际并网点的采样信号可求出虚拟并网点的电气量,如下两式所示:

$$\begin{bmatrix} V_{pd} \\ V_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{td} \\ V_{tq} \end{bmatrix} - sL_\Delta \begin{bmatrix} i_{td} \\ i_{tq} \end{bmatrix} - \omega L_\Delta \begin{bmatrix} i_{tq} \\ -i_{td} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{cases} P = V_{pd}i_{td} + V_{pq}i_{tq} \\ V_p = \sqrt{V_{pd}^2 + V_{pq}^2} \end{cases} \quad (24)$$

式中: V_{pd} , V_{pq} , V_p 分别为虚拟并网点电压的 d , q 轴分量及幅值。

基于式(24)求出的虚拟并网点有功和电压作为 VSC 外环控制量,以实现虚拟并网点的控制。同样的, PLL 追踪虚拟并网点电压,如下式所示:

$$\theta_{\text{pll}} = \frac{1}{s} [\omega_0 - G_\theta(s)V_{pq}] \quad (25)$$

此时虚拟并网点与 VSC 端口间的等效电感变为 $L_t + L_\Delta$,因此电流内环需按下式进行修正:

$$\begin{cases} E_d = V_{pd} + \omega(L_t + L_\Delta)i_{tq} + G_I(s)(i_{d\text{ref}} - i_{td}) \\ E_q = V_{pq} - \omega(L_t + L_\Delta)i_{td} + G_I(s)(i_{q\text{ref}} - i_{tq}) \end{cases} \quad (26)$$

基于式(5)~式(8),针对虚拟并网点的电气量控制方式。值得指出的是,若虚拟并网点的选择位置离交流系统过近,将使得式(26)中 $L_t + L_\Delta$ 的值过大,在控制并网点电压幅值不变时,将造成 VSC 端口电压 E 过高,进而导致 PWM 环节的调制比显著升高,造成 VSC 输出电压谐波含量过高等问题。因此,虚拟并网点并非随意选择,在实际选择时应根据 VSC 输出功率及调制比限值来适当选取。调制比 m 的表达式如下所示:

$$m = \frac{2\sqrt{6}E}{3U_{\text{DC}}} \quad (27)$$

式中: U_{DC} 为直流电压。

为保证交流系统电能质量,通常限定 $m \leq 1$,因此可计算出当前 U_{DC} 条件下所允许的最大VSC端口电压 E_{max} 如下式所示:

$$E_{max} = \sqrt{6} U_{DC} / 4 \quad (28)$$

再基于 E_{max} 求出当前 U_{DC} 条件满足调制比约束的VSC最大传输功率:

$$P_{max} = E_{max} V_s / (X_f + X_g) \quad (29)$$

基于当前VSC的输出功率 P ,即可计算出所需选取的 X_Δ 如下式所示:

$$X_\Delta = X_g - V_p V_s \sin \theta_p / P \quad (30)$$

式中: θ_p 为虚拟并网点的相位; X_Δ 为 L_Δ 对应的电抗。

需要注意的是,将式(29)求出的 P_{max} 代入式(30)中,可求出满足VSC的PWM环节不出现过调制时的最大 X_Δ ,可记为 $X_{\Delta max}$,在选取 X_Δ 时其值不可超过 $X_{\Delta max}$ 。

3.2 控制参数自适应设计

虚拟并网点位置确定后,并网点电压稳态、并网点到交流电网间的等效电感均发生了变化,这将影响交流电压外环的带宽。因此若不对交流电压外环的控制参数进行调整,可能使得交流电压外环的带宽变得更为接近PLL或有功外环带宽,使控制策略对弱并网VSC稳定性起不到预期的提升效果。

下面介绍交流电压外环参数自适应设计的原理。

1)首先确定传统矢量控制策略下的PLL、有功外环及交流电压外环带宽的初始设计值;

2)其次根据实际工况确定虚拟并网点,再按下式计算出虚拟并网点到交流系统间的等效阻抗:

$$X_{g_eq} = \omega(L_g - L_\Delta) \quad (31)$$

3)再求解交流电压外环传递函数,并遍历交流电压外环的PI系数,直至交流电压闭环传递函数的带宽 ω_v 与初始设计值保持一致。

4 仿真验证

本节基于甘肃酒泉地区大规模光伏接口VSC经长距离交流线路并网的典型拓扑,利用PSCAD仿真环境下搭建的弱并网VSC系统开关模型,对本文提出的自适应型虚拟并网点控制策略进行了仿真验证。图9给出了酒泉地

区光伏接口VSC经长距离交流线路并网的拓扑结构。酒泉市广至藏族乡有大量光伏集中发电设备,经由场站接口VSC变流接入广至变电站。然而此处地处农村,当地负荷少,大量光伏上网功率需经由长距离交流线路送至酒泉市肃州城区电网消纳。针对此拓扑结构展开仿真验证。

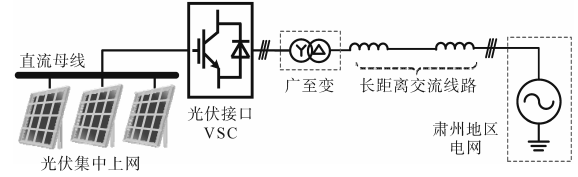


图9 实际电网拓扑结构

Fig.9 Actual power grid topology

4.1 有功功率输出上限提升效果验证

图10给出了VSC输出功率升高时传统矢量控制策略下,以及选取 $L_\Delta=16$ mH时,参数自适应的虚拟并网点控制策略下,VSC有功功率输出上限的对比结果。

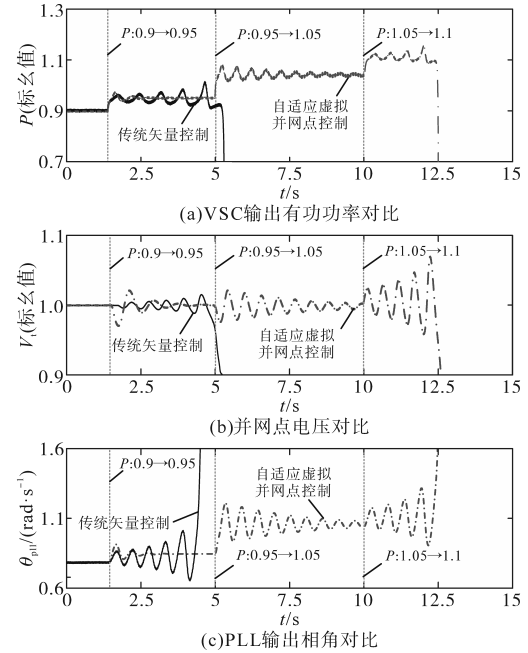


图10 有功功率输出上限提升效果验证

Fig.10 Effect of verification of raising VSC active power output upper limit

由图10可见,传统控制策略下,VSC的输出功率由0.9(标么值)阶跃至0.95(标么值)时,系统失稳。而采用参数自适应的虚拟并网点控制策略时,VSC的输出功率升高至1.05(标么值)时系统仍保持稳定,直至由1.05(标么值)阶跃至1.1(标么值)时才出现失稳。上述分析结果验证了参数自适应的虚拟并网点控制策略对于弱并

网VSC有功功率输出上限的提升效果。

4.2 参数自适应选取的效果验证

图11给出了VSC输出功率升高时,仅采用虚拟并网点控制,以及采用参数自适应的虚拟并网点控制策略时,VSC有功功率输出上限的对比结果。

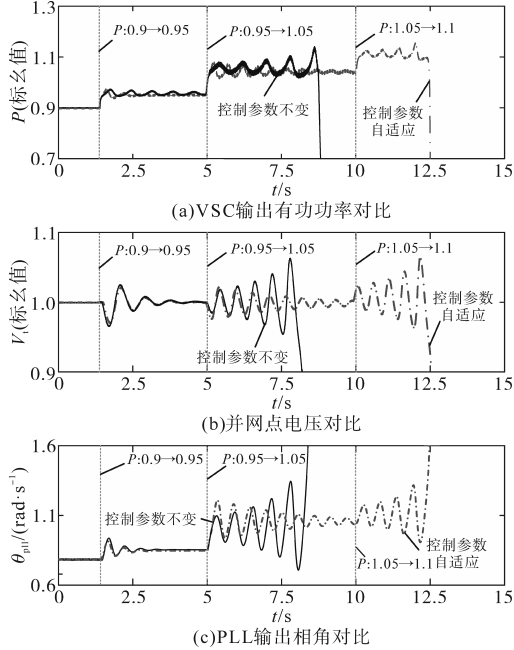


图11 参数自适应选取的效果验证

Fig.11 Effect verification of parameter adaptive selection

基于表1中系数,且仍选取 $L_{\Delta}=16\text{ mH}$,若不进行参数自适应选取,交流电压外环的带宽将接近PLL,此时由图11可见,VSC在输出功率升高至1.05(标么值)时出现失稳。仿真结果验证了采用交流电压外环参数自适应选取时,虚拟并网点控制策略对于提升弱并网VSC系统小扰动稳定性更为有效。

4.3 VSC端口电压限幅的必要性验证

图12给出了 L_{Δ} 取值过大,导致VSC端口电压过高,进而造成VSC的PWM环节过调制时,系统的动态特性。由图12并结合表1参数可求出,当 $L_{\Delta}=30\text{ mH}$ 时,调制比 $m>1$,此时VSC输出的交流波形谐波含量显著增加,甚至VSC并未因选取了更大的 L_{Δ} 而使得功率升高,反而因为交流系统谐波含量过大而导致功率在升高至1.05(标么值)时就出现失稳。由此可见在采用自适应参数的虚拟并网点控制策略提升弱并网VSC小扰动稳定性时,必须基于PWM调制比的限制,对 L_{Δ} 的选取附加上限。

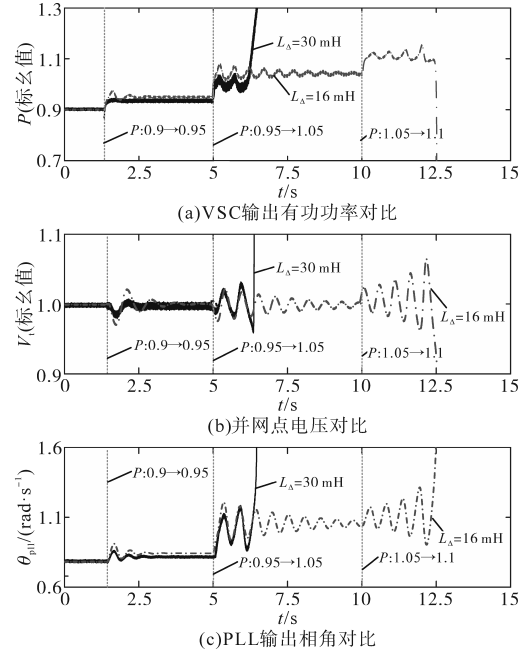


图12 VSC端口电压限幅必要性验证

Fig.12 Necessity verification of VSC port voltage limiting

5 结论

针对弱并网VSC存在小扰动稳定性问题,输出功率上限降低的问题,本文基于弱并网VSC系统稳定性机理分析,提出了一种控制参数自适应型虚拟并网点控制策略,具体贡献如下:

1)基于交流电压外环推导建立了一种弱并网VSC系统小扰动稳定性机理模型,该模型具有良好的通用性,对于不同外环控制模式下的弱并网VSC均适用;

2)基于建立的模型进行了机理分析,结果表明,有功功率外环、交流电压外环及PLL三者间,任意两者的带宽相互接近时,弱并网VSC的小扰动稳定性均下降,导致VSC输出功率上限降低;

3)提出了一种控制参数自适应型虚拟并网点控制策略,实现了对弱并网VSC输出功率上限的有效提升,并计及PWM调制比限制,保证了交流系统电能质量。

随着可再生能源接入比例的提升,该控制策略在可再生能源接口VSC弱并网方面的作用将更为显著。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.

- ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 蔡文斌,程晓磊,南家楠. 高比例新能源电力系统灵活性资源充裕性评估分析[J]. 电气传动, 2022, 52(20): 57-62.
- CAI Wenbin, CHENG Xiaolei, NAN Jianan. Assessment and analysis of adequacy of flexibility resource of power system with high proportion new energy[J]. Electric Drive, 2022, 52(20): 57-62.
- [3] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
- LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [4] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高压电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
- XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [5] 张志军,李帆,孟庆波. 基于P-Q控制模式的VSC-HVDC小干扰稳定性研究[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 53-58, 64.
- ZHANG Zhijun, LI Fan, MENG Qingbo. Research on small signal stability of VSC-HVDC based on P-Q control mode[J]. Electric Drive, 2020, 50(8): 53-58, 64.
- [6] 王旭斌,杜文娟,王海风. 弱连接条件下并网VSC系统小扰动稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.
- WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.
- [7] 张硕文,苗虹,曾成碧. 增强并网逆变器对弱电网适应能力的控制策略[J]. 电气传动, 2021, 51(9): 43-48.
- ZHANG Shuowen, MIAO Hong, ZENG Chengbi. Control strategy for enhancing adaptability of grid connected inverter to weak power grid[J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 43-48.
- [8] 李霞林,李佳鑫,朱琳,等. 弱连接VSC在“外环-锁相环”时间尺度下的一类小扰动稳定性提升方法及等效性分析[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1632-1642.
- LI Xialin, LI Jiaxin, ZHU Lin, et al. Equivalence analysis of a class of small-signal stability enhanced methods for weak grid connected VSCs in “outer-loop & PLL” time-scale[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1632-1642.
- [9] ZHOU J, GOLE A. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics[C]// IET International Conference on AC & DC Power Transmission IET, 2013: 1-5.
- [10] ZHOU J Z, DING H, FAN S T, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [11] HUANG Yunhui, YUAN Xiaoming, HU Jiabing, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 3(4): 1193-1204.
- [12] ARANI M, MOHAMED A. Analysis and performance enhancement of vector-controlled VSC in HVDC link connected to very weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(1): 684-693.
- [13] WEN B, BOROYEVI D, ROLANDO B, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(1): 675-687.
- [14] HUANG Y, ZHAI X, HU J, et al. Modeling and stability analysis of VSC internal voltage in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 3(27): 1425-1439.
- [15] 吴广禄,王姗姗,周孝信,等. VSC接入弱电网时外环有功控制小扰动稳定性解析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 1987-1998.
- WU Guanglu, WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, et al. Analytical analysis on the active power control stability of the weak grids-connected VSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 1987-1998.
- [16] HUANG Yunhui, YUAN Xiaoming, HU Jiabing, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 3(4): 1193-1204.
- [17] 王姗姗,赵兵,吴广禄,等. 弱电网下VSC型电力电子设备外环增强阻尼控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 185-194.
- WANG Shanshan, ZHAO Bing, WU Guanglu, et al. Outer-loop improved damping control strategy for weak grid-tied VSC devices[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 185-194.
- [18] 辛焕海,董炜,袁小明,等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
- XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices in-feed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [19] 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.
- WU Guanglu, ZHOU Xiaoxin, LI Yalou, et al. Improved vector control for VSC-HVDC connected to weak AC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4577-4590.
- [20] EGEA A, FEKRIASL S, HASSAN F, et al. Advanced vector control for voltage source converters connected to weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3072-3081.
- [21] 王焱,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, 3149.
- WANG Ye, NING Linru, ZHAO Chengyong, et al. A novel supplementary frequency-based damping control for VSC-HVDC station connected to a weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2989-2998, 3149.
- [22] GUO Chunyi, YANG Shuo, LIU Wei, et al. Small-signal stability

- ty enhancement approach for VSC-HVDC system under weak AC grid conditions based on single-input single-output transfer function model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3):1313-1323.
- [23] 苑宾,许建中,赵成勇,等. 利用虚拟电阻提高接入弱交流电网的 MMC 小信号稳定性控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15):3794-3802.
- YUAN Bin, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. A virtual resistor based control strategy for enhancing the small-signal stability of MMC integrated in weak AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15):3794-3802.
- [24] 袁艺嘉,赵成勇,苑宾,等. 弱交流电网条件下 VSC 无功类控制分析与优化[J]. 电网技术, 2016, 40(3):696-703.
- YUAN Yijia, ZHAO Chengyong, YUAN Bin, et al. Analysis and optimization of reactive power controllers of voltage source converters in weak AC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3):696-703.
- [25] 王常安,刘俊勇. 提高 VSC 无功功率支撑能力的直流电压补偿控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2):63-74.
- WANG Chang'an, LIU Junyong. DC voltage compensation control strategy for improving VSC reactive power support capability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(2):63-74.
- [26] MFM Arani, ARI Mohamed. Analysis and performance enhancement of vector-controlled VSC in HVDC links connected to very weak grids[J]. IEEE Trans. on Power Syst., 2017, 32(1):684-693.

收稿日期:2022-10-29

修改稿日期:2022-11-09

(上接第 20 页)

- 池特性建模[J]. 电网技术, 2017, 41(8):2695-2702.
- HUANG Kai, GUO Yongfang, LI Zhigang. Modeling of power lithium-ion behavior considering hysteresis effect[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2695-2702.
- [11] WEI Z, ZHAO D, HE H, et al. A noise-tolerant model parameterization method for lithium-ion battery management system[J]. Applied Energy, 2020, 268:114932.
- [12] WEI Z, DONG G, ZHANG X, et al. Noise-immune model identification and state-of-charge estimation for lithium-ion battery using bilinear parameterization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(1):312-323.
- [13] MIAO H, CHEN J, MAO L, et al. A novel online model parameters identification method with anti-interference characteristics for lithium-ion batteries[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(6):9502-9517.
- [14] ZHENG F, XING Y, JIANG J, et al. Influence of different open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2016, 183:513-525.
- [15] 熊瑞. 基于数据模型融合的电动车辆动力电池组状态估计研究[D]. 北京:北京理工大学, 2014.
- XIONG Rui. Research on state estimation of electric vehicle power battery pack based on data model fusion[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2014.
- [16] XING Y, HE W, PECHT M, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures[J]. Applied Energy, 2014, 113:106-115.

收稿日期:2022-09-23

修改稿日期:2022-11-02