

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.2.250

中图分类号: TM46

文献标志码: A

超导磁储能装置提高柔性直流配电系统稳定性的研究

李 岚¹, 丁安敏¹, 田洪英¹, 张 彦², 张奎同², 马文忠¹

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 青岛 266580; 2. 山东能源集团, 济南 273500)

摘要: 柔性直流配电系统中定功率控制的换流器具有恒功率负载特性, 会降低系统阻尼, 对系统的稳定性产生不利影响。针对该问题, 在直流配电系统中加入超导磁储能 SMES(superconducting magnetic energy storage)装置来提高系统的稳定性。推导了柔性直流配电系统的反馈控制模型, 采用频域分析法研究了换流器恒功率负载特性对系统稳定性的影响, 并结合数学模型和频域分析, 指出 SMES 装置能够为电网提供正阻尼, 增大了系统开环传递函数在剪切频率处的相位裕度, 从而改善了系统稳定性。为防止超导磁体两端电压过高, SMES 装置与直流配电网连接的 DC/DC 换流器需具备一定的电压调节性能, 因此研究了采用模块化多电平 DC/DC 换流器 DC-MMC(modular multilevel DC/DC converter)的 SMES 装置, 通过调节子模块个数灵活设置换流器电压变比, 在实现换流器能量双向流动的同时控制超导磁体两端电压, 以保护储能装置。最后通过时域仿真波形验证了采用 DC-MMC 的 SMES 装置在提高柔性直流配电系统稳定性方面的可行性和有效性。

关键词: 柔性直流配电系统; 超导磁储能; 小信号稳定性; 反馈控制模型; 模块化多电平 DC/DC 换流器

Research on Superconducting Magnetic Energy Storage Device to Improve the Stability of Flexible DC Distribution System

LI Lan¹, DING Anmin¹, TIAN Hongying¹, ZHANG Yan², ZHANG Kuitong², MA Wenzhong¹

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Shandong Energy Group Co., Ltd, Ji'nan 273500, China)

Abstract: The converter with constant-power control in a flexible DC distribution system has characteristics of constant-power load, which will reduce the system damping and adversely affect the system stability. To address this problem, a superconducting magnetic energy storage(SMES) device is introduced to improve the system stability. A feedback control model of the flexible DC distribution system is derived, and the effect of constant-power load characteristics of the converter on system stability is investigated by frequency-domain analysis. Combined with a mathematical model and frequency-domain analysis, it is also pointed out that the SMES device can improve the system stability by introducing positive damping to grid and increasing the phase margin of the system's open-loop transfer function at the shear frequency. To prevent over-high voltage at both ends of the superconducting magnet, the DC/DC converter which connects the SMES device with the DC distribution network needs to have certain voltage regulation performance. Therefore, the SMES device with a modular multilevel DC/DC converter(DC-MMC) is studied, which can adjust the number of sub-modules flexibly to set the voltage ratio of the converter. Moreover, the DC-MMC can control the voltage at both ends of the superconducting magnet while realizing a bidirectional flow of energy in the converter, thus protect-

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-09-08, 2021-10-06;

录用日期: 2021-10-19; 网络首发日期: 2021-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777216); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2018MEE040, ZR2019MEE094)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51777216; Natural Science Foundation of Shandong Province under the grant ZR2018MEE040 and ZR2019MEE094

ing storage device. The feasibility and effectiveness of the SMES device with DC-MMC in improving the stability of flexible DC distribution system is verified by time-domain simulation waveforms.

Keywords: Flexible DC distribution system; superconducting magnetic energy storage(SMES); small signal stability; feedback control model; modular multilevel DC/DC converter(DC-MMC)

基于柔性直流技术的配电系统具有结构灵活,有功功率和无功功率可独立控制等优势,更适合现代配电系统的发展。但柔性直流系统中的电压源型换流器 VSC(voltage source converter)采用定功率控制时等效为一个恒功率负载,对外呈现出负阻抗的特性,这将导致系统在受到小扰动时容易发生振荡,为系统的稳定运行带来不利影响^[1-2]。因此,提高系统阻尼、改善系统稳定性对柔性直流配电系统的发展和应用具有重要意义。

目前提高直流电网稳定性的控制方法一般有 无源法^[3-4]和有源法^[5-7]。无源法和有源法能增加系统阻尼,在改善直流电网稳定方面取得了良好的成效。但直流配电系统中控制器的控制效果受系统运行状态等多种因素的影响,无源法在保证系统稳定的同时也会因为增加无源器件而导致额外的功率损耗,降低转换效率;通过有源法增强级联系统的稳定性一般也会牺牲负载的动态性能,且阻尼控制器鲁棒性问题的设计研究比较复杂。除上述方法,在系统中外接储能装置也是一种提高系统稳定性的高效办法。储能装置具有灵活的功率调节能力,能够快速补偿系统的不平衡功率,在电力系统的应用中取得了一定的成果^[8-11]。目前储能技术有飞轮储能、超级电容储能、超导磁储能和电池储能等。其中超导磁储能 SMES 装置充、放电次数不受限制,具有响应速度快、功率密度高和抗干扰能力强等特点,更适合应用于抑制波动性和间歇性较强的新能源接入、电力系统存在谐振的场合^[12-15]。

SMES 装置与电网之间实现能量的双向流动主要依靠于 DC/DC 换流器。双向 DC/DC 换流器作为超导磁体与电网的接口,在功率转换中起到传递能量的作用,通过控制电力电子开关,进行能量的储存和释放,可以降低直流侧电压波动,对抑制直流振荡,提高整个系统稳定性具有重要意义。文献[16-20]中的 DC/DC 换流器通过一定的控制策略能够实现功率的双向流动。但当 SMES 工作时,施加在超导磁体的两端电压等于电网侧电压,这种拓扑结构的换流器不太适合电压较高的场合使用。因此,研究能够适应于宽范围电压场合的 DC/DC 换流器对储

能装置尤为重要。

目前应用于电压较高、功率较大场合的储能系统 DC/DC 换流器一般有隔离型 DC/DC^[21-23]和非隔离型 DC/DC。当电网出现局部故障时,隔离型 DC/DC 换流器可以防止故障进一步扩散,有利于直流电网的稳定运行,但这种换流器中的电气隔离设计也会增大换流器的体积和成本;非隔离型 DC/DC 换流器电路相对简单,成本较低,但含有半控型器件的非隔离型换流器存在动态响应较慢,可靠性较低等问题^[24-25]。除此之外,非隔离型模块化多电平的 DC/DC 换流器也得到了广泛的研究和关注,通过在桥臂中添加子模块,从而获得一定的故障处理能力,提高了系统的可靠性^[26-27]。本文在文献[27]的基础上研究了一种模块化多电平 DC/DC 换流器,换流器每相桥臂输出侧加装滤波器,滤除输出电流中的交流分量,桥臂中串联了用以抑制系统故障暂态冲击电流的电感,对开关器件起到一定保护作用,而且模块化多电平换流器可以根据电网电压合理增减子模块数量以满足不同电压等级场合的应用。

本文讨论了 SMES 装置在改善柔性直流配电系统稳定性方面的作用。首先建立柔性直流配电系统的反馈控制模型,根据 Nyquist 稳定性判据,采用频域分析方法分析换流器恒功率负载特性对系统稳定性的影响;然后介绍一种采用 DC-MMC 换流器的 SMES 装置的工作原理,通过在直流电网并联 SMES 装置提高系统稳定性,并给出了 SMES 装置改善系统稳定性的工作机理;最后通过仿真算例进行验证。

1 柔性直流配电系统结构

柔性直流配电系统结构如图 1 所示,配电系统中的柔性互联装置、交直流负荷和直流微网等多个设备通过变换器与直流网络进行功率交换。为提高供电的可靠性,配电系统采用了两端供电拓扑结构,换流站 VSC₁ 为定直流电压控制,VSC₂ 为定有功功率控制,设定系统功率方向由 VSC₁ 流向 VSC₂。采用定功率控制的 VSC₂ 对外表现出恒功率的负载特性,其直流电压、电流特性曲线如图 2 所示。

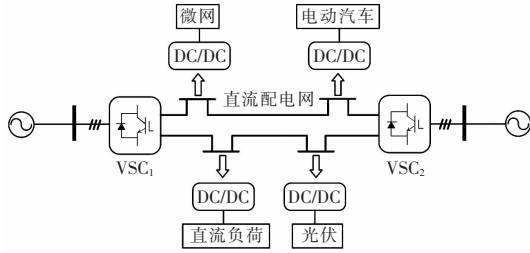


图 1 两端柔性直流配电系统

Fig. 1 Two-terminal flexible DC distribution system

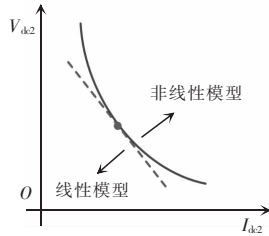


图 2 恒功率负载特性

Fig. 2 Constant-power load characteristics

忽略换流器损耗,具有恒功率负载特性的 VSC₂ 功率为

$$P_{\text{load}} = V_{\text{dc}2} I_{\text{dc}2} \quad (1)$$

式中, $V_{\text{dc}2}$ 和 $I_{\text{dc}2}$ 分别为 VSC₂ 中的直流电压与电流。已知换流站直流侧动态方程^[9](此公式推导许多文献中已有说明,此处不再详细展开)为

$$C_{\text{dc}2} \frac{dV_{\text{dc}2}}{dt} = I_s - I_{\text{dc}2} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{dc}2}$ 为 VSC₂ 侧的直流电容; I_s 为实际流入到 VSC₂ 侧的直流电流。

对式(2)进行线性化可得

$$C_{\text{dc}2} \frac{d\Delta V_{\text{dc}2}}{dt} = \Delta I_s - \Delta I_{\text{dc}2} = \Delta I_s - \Delta \left(\frac{P_{\text{load}}}{V_{\text{dc}2}} \right) = \Delta I_s + \left(\frac{P_{\text{load},0}}{V_{\text{dc}2,0}^2} \right) \Delta V_{\text{dc}2} \quad (3)$$

式中:下标‘0’表示变量的稳态分量; Δ 表示变量的小信号量。

根据式(3),VSC₂ 的线性化阻抗可以定义为

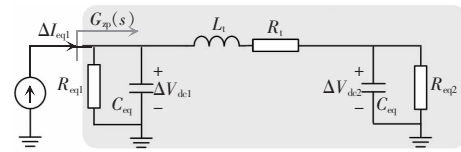
$$Z_{\text{VSC}_2} = \frac{\Delta V_{\text{dc}2}}{\Delta I_{\text{dc}2}} = - \frac{\Delta V_{\text{dc}2,0}^2}{P_{\text{load},0}} = R_{\text{VSC}_2} \quad (4)$$

式中, R_{VSC_2} 为 VSC₂ 的线性化等效电阻,当 $P_{\text{load}} > 0$ 时, R_{VSC_2} 为负值,意味着当系统平衡点发生小扰动时, VSC₂ 相当于一个负电阻,这会减小系统阻尼,不利于系统的稳定运行^[28]。

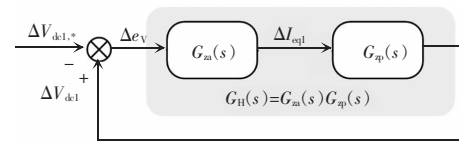
2 柔性直流配电系统反馈控制模型

电力系统小信号稳定性分析方法有模态分析和阻抗分析等。模态分析需要系统组成单元的全部参数,才能建立统一的系统状态空间模型;阻抗分析需要在输入阻抗和输出阻抗模型推导的基础上进行判稳,这 2 种方法的模型建立和公式推导过程相对复杂。VSC₂ 恒功率运行时的动态特性对系统稳定性影响较小,因此本文根据 VSC₁ 的控制动态和 VSC₂ 的恒功率负载特性,建立了柔性直流配电系统的反馈控制模型,简化了建模过程。本文主要考察的是配电系统中换流器对系统稳定性的影响,因此忽略了直流电网互联设备与系统的交互作用。

图 3 为简化的两端柔直配电系统模型。图 3 及下文中的‘*’表示变量的参考值; C_{eq} 为直流线路集总电容和换流器直流侧电容之和; R_1 和 L_1 分别为传输线路的等效电阻和电感; $R_{\text{eq}1}$ 和 $R_{\text{eq}2}$ 分别为 VSC₁ 和 VSC₂ 直流侧等效电阻; $V_{\text{dc}1}$ 和 $V_{\text{dc}2}$ 分别为换流器直流侧电压; $I_{\text{eq}1}$ 为虚拟电流。 Δe_V 为小信号变量参考值与实际值之间的误差。



(a) 线性化等效电路



(b) 变量反馈控制结构框图

图 3 简化的两端柔性直流配电系统模型

Fig. 3 Simplified model of two-terminal flexible DC distribution system

图 3(a) 可使用由阻抗函数 $G_p(s)$ 和控制函数 $G_m(s)$ 组成前向通路的反馈控制系统建模,其结构如图 3(b) 所示。图 3(b) 中, $G_p(s)$ 相当于从虚拟端口看进去的戴维南阻抗,定义 $G_p(s) = \Delta V_{\text{dc}2} / \Delta I_{\text{eq}1}$ 。将 VSC₂ 的直流电压参考量和反馈量作为反馈控制系

统的参考和反馈,定义 $G_{za}(s)=\Delta I_{eq1}(s)/\Delta e_v(s)$, 因此系统开环传递函数 $G_H(s)=G_{za}(s)G_{zp}(s)$ 。 $G_{zp}(s)$ 可通过戴维宁定理进行求解,下文将给出 $G_{za}(s)$ 的推导方法。

考虑 PLL 动态特性,假设实际电气系统与控制系统 dq 坐标系之间的夹角为 θ_{PLL} ,两坐标系之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta x_d^s \\ \Delta x_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 & -x_{d,0}^c \sin \theta_0 - x_{q,0}^c \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 & x_{d,0}^c \cos \theta_0 - x_{q,0}^c \sin \theta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_d^c \\ \Delta x_q^c \\ \Delta \theta_{PLL} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

式中, x_d 和 x_q 为在 dq 坐标系下的变量。

换流器连接交流系统的线性化方程为

$$\begin{cases} (L_c s + R_c) \Delta i_{cd}^s = \omega L_c \Delta i_{cq}^s + \Delta u_{cd}^s - \Delta u_{sd}^s \\ (L_c s + R_c) \Delta i_{cq}^s = -\omega L_c \Delta i_{cd}^s + \Delta u_{cq}^s - \Delta u_{sq}^s \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω 为交流系统电压角频率; i_{cd}^s 和 i_{cq}^s 分别为交流电流 dq 轴分量; u_{cd}^s 和 u_{cq}^s 、 u_{sd}^s 和 u_{sq}^s 分别为换流站交流电压、公共耦合点电压的 dq 轴分量。

内环电流控制器的线性化方程为

$$\begin{cases} \Delta i_{cd}^c = G_{in}(s) (\Delta i_{cd}^{c*} - \Delta i_{cd}^c) - \omega L_c \Delta i_{cq}^c + \Delta u_{sd}^c \\ \Delta i_{cq}^c = G_{in}(s) (\Delta i_{cq}^{c*} - \Delta i_{cq}^c) + \omega L_c \Delta i_{cd}^c + \Delta u_{sq}^c \end{cases} \quad (7)$$

联合式(5)~(7)可得实际系统中电压的 dq 轴分量为

$$\begin{cases} \Delta u_{cd}^s = \Delta u_{sd}^s - \omega L_c \Delta i_{cq}^s - G_{in}(s) \Delta i_{cd}^s + G_{in}(s) (\cos \theta_0 \Delta i_{cd}^{c*} - \sin \theta_0 \Delta i_{cq}^{c*}) - (i_{cd,0}^c \sin \theta_0 + i_{cq,0}^c \cos \theta_0) \Delta \theta_{PLL} [G_{in}(s) + R_c] \\ \Delta u_{cq}^s = \Delta u_{sq}^s + \omega L_c \Delta i_{cd}^s - G_{in}(s) \Delta i_{cq}^s + G_{in}(s) (\sin \theta_0 \Delta i_{cd}^{c*} + \cos \theta_0 \Delta i_{cq}^{c*}) + (i_{cd,0}^c \cos \theta_0 - i_{cq,0}^c \sin \theta_0) \Delta \theta_{PLL} [G_{in}(s) + R_c] \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入到式(6)中,可得到实际系统中交流电流的 dq 轴分量

$$\begin{cases} \Delta i_{cd}^s = \frac{\cos \theta_0 G_{in}(s)}{G_A(s)} \Delta i_{cd}^{c*} - \frac{\sin \theta_0 G_{in}(s)}{G_A(s)} \Delta i_{cq}^{c*} - i_{cq,0}^c \left(\frac{G_{in}(s) + R_c}{G_A(s)} \right) \Delta \theta_{PLL} \\ \Delta i_{cq}^s = \frac{G_{in}(s) \sin \theta_0}{G_A(s)} \Delta i_{cd}^{c*} + \frac{G_{in}(s) \cos \theta_0}{G_A(s)} \Delta i_{cq}^{c*} + i_{cd,0}^c \left(\frac{G_{in}(s) + R_c}{G_A(s)} \right) \Delta \theta_{PLL} \end{cases} \quad (9)$$

式中:下标 d, q 分别代表变量的 dq 轴分量;上标 s, c 分别表示在实际电气系统和控制系统的变量; $G_A(s) = L_c s + R_c + G_{in}(s)$; R_c 和 L_c 分别为换流站交流侧等效电阻和等效电感; $G_{in}(s) = k_{p1} + k_{i1}/s$, k_{p1} 和 k_{i1} 分别为内环电流控制器的比例参数和积分参数; θ_{PLL} 为实际电气系统与控制系统 dq 坐标系之间的夹角; θ_0 为 θ_{PLL} 的稳态分量。

已知锁相环控制器小信号方程为

$$\Delta \theta_{PLL} = \frac{F_{PLL}(s)}{s + U_{f0} F_{PLL}(s)} [-\sin \theta_0 \quad \cos \theta_0] \begin{bmatrix} \Delta u_{sd}^s \\ \Delta u_{sq}^s \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $F_{PLL}(s) = k_{p,PLL} + k_{i,PLL}/s$; $k_{p,PLL}$ 和 $k_{i,PLL}$ 分别为锁相环控制器中的比例参数和积分参数; $U_{f0} = u_{sd,0}^s \cos \theta_0 + u_{sq,0}^s \sin \theta_0$ 。

联立式(9)和式(10),整理得到矩阵

$$\Delta i_c^s = \underbrace{\frac{G_{in}(s)}{G_A(s)} \begin{bmatrix} \cos \theta_0 & -\sin \theta_0 \\ \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \end{bmatrix}}_{F_c} \Delta i_c^{c*} + \frac{G_{PLL}(s)}{G_A(s)} \cdot \underbrace{G_{in}(s) + R_c \begin{bmatrix} \sin \theta_0 i_{cq,0}^c & \cos \theta_0 i_{cd,0}^c \\ \sin \theta_0 i_{cd,0}^c & \cos \theta_0 i_{cq,0}^c \end{bmatrix}}_{F_p} \Delta u_s^s \quad (11)$$

换流站连接交流侧的微分方程式可以写为

$$\begin{cases} L_g \frac{d \Delta i_g^s}{dt} + R_g \Delta i_g^s = \Delta u_s^s - \Delta u_g^s \\ C_f \frac{d \Delta u_s^s}{dt} = \Delta i_c^s - \Delta i_g^s \end{cases} \quad (12)$$

式中: L_g 为交流电源等效电感; C_f 为公共耦合点滤波电容; i_g 为交流系统电源; R_g 交流电源等效电阻; u_g 为交流电源内电势。

当 $\Delta u_g^s = 0$ 时,结合式(11)和式(12),可以消掉 Δu_s^s ,即

$$\Delta i_c^s = [I - F_p (Y_f + Y_g)^{-1}] F_c \Delta i_c^{c*} = F_{cl} \Delta i_c^{c*} \quad (13)$$

式中: I 为单位矩阵; $Y_f = C_f s$; $Y_g = L_g s + R_g$ 。

VSC₁ 采用定直流电压控制,假设无功功率给定 $\Delta Q_s^* = 0$,则外环控制规律可以表示为

$$\begin{cases} \Delta i_{cd}^{c*} = G_{dvc}(s) (\Delta V_{dc}^* - \Delta V_{dc}) = G_{dvc}(s) \Delta e_v \\ \Delta i_{cq}^{c*} = G_q(s) (\Delta Q_s - \Delta Q_s^*) \approx G_q(s) \Delta Q_s \end{cases} \quad (14)$$

式中: $G_{dvc}(s) = k_{pdc} + k_{idc}/s$; k_{pdc} 和 k_{idc} 分别为定直流电压控制器的比例参数和积分参数; $G_q(s) = k_{pq} + k_{iq}/s$; k_{pq} 和 k_{iq} 分别为定无功功率控制器的比例参数和积分参数。

根据换流器端口无功功率方程,并立式(11)可得

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{cd}^* \\ \Delta i_{cq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{dvc}(s) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_v \\ 0 \end{bmatrix} + G_q(s) \begin{bmatrix} \Delta i_{cd}^* \\ \Delta i_{cq}^* \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ u_{sq,0} & -u_{sd,0} \end{bmatrix} - G_q(s) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ i_{cq,0} & i_{cd,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{sd}^* \\ \Delta u_{sq}^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)整理得

$$\Delta \dot{i}_c = (\mathbf{F}_{cl}^{-1} - \mathbf{F}_1)^{-1} \mathbf{F}_v \Delta e = \mathbf{F}_M \Delta e \quad (16)$$

联合式(13)和式(16),换流站端口有功功率可以表示为

$$\Delta P_c = [u_{cd,0} \quad u_{cq,0}] \begin{bmatrix} \Delta i_{cd}^* \\ \Delta i_{cq}^* \end{bmatrix} + [i_{cd,0} \quad i_{cq,0}] \cdot \\ \left[\begin{bmatrix} R_c & -\omega L_c \\ \omega L_c & R_c \end{bmatrix} + \mathbf{F}_p^{-1} (\mathbf{I} - \mathbf{F}_c \mathbf{F}_{cl}^{-1}) \right] \begin{bmatrix} \Delta i_{cd}^* \\ \Delta i_{cq}^* \end{bmatrix} = \\ (\mathbf{u}_{c,0}^T + \mathbf{i}_{c,0}^T \mathbf{Z}_T) \Delta \dot{i}_c = \mathbf{M}_c \Delta \dot{i}_c \quad (17)$$

综上公式推导,虚拟直流电流的矩阵方程可表示为

$$\Delta I_{eq1} = \frac{\Delta P_c}{V_{dc1,0}} = \frac{1}{V_{dc1,0}} \mathbf{M}_c \Delta \dot{i}_c = \frac{1}{V_{dc1,0}} \mathbf{M}_c \mathbf{F}_M \Delta e = \\ \mathbf{\Pi}_c \begin{bmatrix} \Delta e_v \\ 0 \end{bmatrix} = [\mathbf{\Pi}_1 \quad \mathbf{\Pi}_2] \begin{bmatrix} \Delta e_v \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{\Pi}_1 \Delta e_v \quad (18)$$

式中, $\mathbf{\Pi}_1$ 为所求取的 $G_{za}(s)$ 。根据图 3(b)所示控制回路,结合 Nyquist 稳定判据可以对系统进行稳定性分析。

3 换流站恒功率负载特性对系统稳定性的影响

基于第 2 节推导的反馈控制模型,结合 Bode 图和 Nyquist 曲线,从频域响应的角度研究了具有恒功率负载特性的换流站对柔直配电系统稳定性的影响,系统稳定性分析参数可参考表 1。设置系统中恒功率负载功率为由 0.6 p.u. 变化到 0.8 p.u.,系统稳定性分析结果如图 4 所示,频域响应参数见表 2。

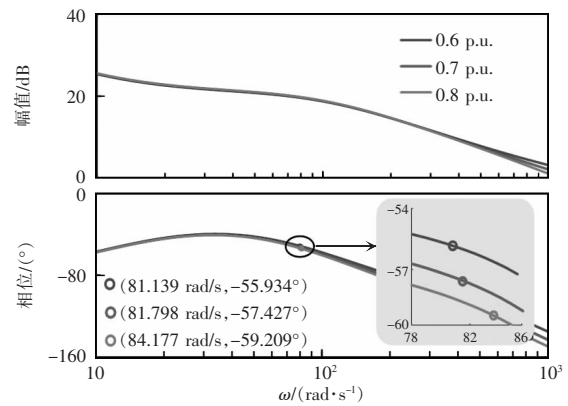
通过图 4 和表 2 可以看出,随着恒功率负载功率的增大, $G_{za}(s)$ 和 $G_{\eta p}(s)$ 的相位逐渐降低,当功率为 0.8 p.u. 时,系统开环传递函数 $G_H(s)$ 的相位裕度为 -10.028° ,相位裕度不足,此时 Nyquist 曲线由不

包围 $(-1, j0)$ 点变为包围 $(-1, j0)$ 点,结合 Nyquist 判据判定系统失去稳定性。由上述分析可得,恒功率负载功率的增大对系统的稳定性产生不利影响,甚至导致系统失稳,由此通过在柔直配电系统中加入 SMES 装置来提高系统稳定性。

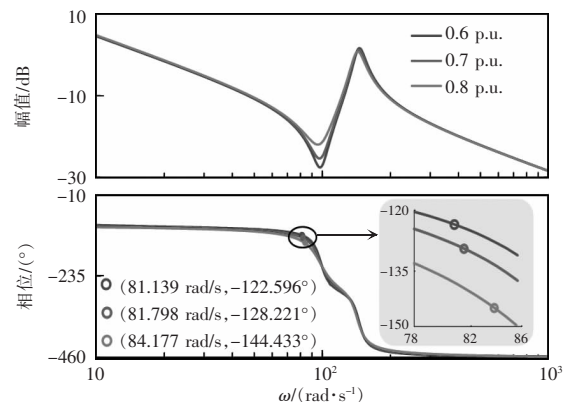
表 1 算例系统初始参数

Tab. 1 Initial parameters of example system

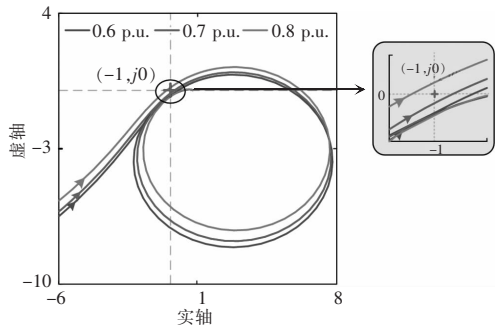
参数	数值
基准视在功率 S_{base}/MVA	1 000
配电网直流电压 V_{dc}/kV	10
电流环控制器比例增益	0.064
电流环控制器积分增益	0.5
直流电压控制器比例增益	8
直流电压控制器积分增益	100
功率控制器比例增益	0.15
功率控制器积分增益	15
锁相环控制器比例增益	46
锁相环控制器积分增益	1 000
VSC ₁ 直流电压参考值 V_{dref1} (p.u.)	1.0
VSC ₂ 有功功率参考值 P_{ref2} (p.u.)	0.5



(a) $G_{za}(s)$ 的 Bode 图



(b) $G_{\eta p}(s)$ 的 Bode 图



(c) $G_H(s)$ 的 Nyquist 曲线

图 4 系统稳定性分析结果

Fig. 4 Analysis results of system stability

表 2 恒功率负载变化时的系统频域响应参数

Tab. 2 Parameters of frequency-domain response with constant power load variation

恒功率负载 功率(p.u.)	剪切频率/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\angle G_{zi}/(^{\circ})$	$\angle G_{zp}/(^{\circ})$	相位 裕度/ $(^{\circ})$
0.6	81.139	-55.934	-122.596	14.149
0.7	81.798	-57.427	-128.221	7.228
0.8	84.177	-59.209	-144.433	-10.028

4 超导磁储能装置

4.1 超导磁储能装置结构

SMES 装置既能储存能量又能释放能量, 具有快速的电磁响应特性和很高的储能效率。含有 SMES 装置的柔性直流配电系统结构如图 5 所示, SMES 装置主要包含 DC/DC 换流器和超导磁体两部分。DC/DC 换流器输入端与直流电网相连, 输出与超导磁体连接, 进行能量的双向传输。当直流配电系统稳定时, SMES 装置不与电网交换功率; 当系统稳定性变差, 出现功率波动时, SMES 装置投入运行, 维持系统功率平衡。

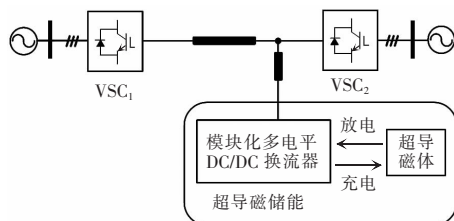


图 5 含有超导磁储能装置的柔性直流配电系统

Fig. 5 Flexible DC distribution system with superconducting magnetic energy storage device

图 6 是 SMES 装置的控制框图。假设绝缘栅双极晶体管 S_1, S_2 的占空比均为 d , 直流电网传输功率测量值与参考值的差值 ΔP 为系统的功率振荡, 功率振荡代表了系统发生小干扰时功率的波动成分, 需要通过 SMES 进行补偿, 以达到消纳直流系统振荡的目的。当 S_1, S_2 的占空比在 $(0, 0.5)$ 范围时, SMES 处于放电状态; 当 S_1, S_2 的占空比在 $(0.5, 1.0)$ 范围时, SMES 处于充电状态。图 6 中: P_{ref} 为直流电网传输功率的参考值; P_s 为直流电网传输功率的测量值; V_{dk2} 为直流电网电压。当 SMES 工作时, 超导磁体两端电压为配电网电压, 磁体两端电压过高, 使装置在实际应用中存在安全隐患。因此, 本文在 SMES 装置中采用了一种能够降低输出电压的换流器—DC-MMC, 以单相 DC-MMC 为例进行介绍, 其结构如图 7 所示。

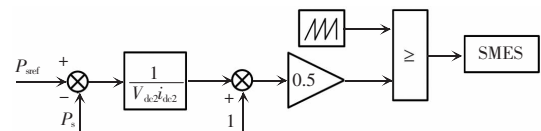


图 6 超导磁储能装置控制框图

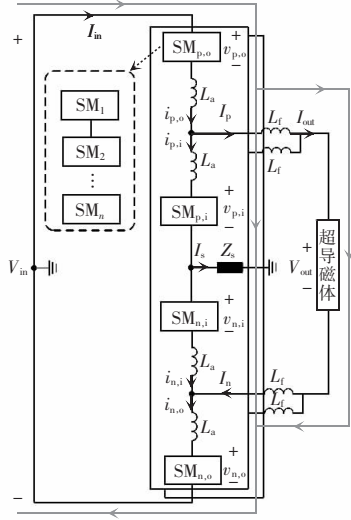
Fig. 6 Control block diagram of superconducting magnetic energy storage device

图 7(a) 中: L_a 为桥臂电感; L_f 为滤波电感; V_{in} 和 I_{out} 分别为换流器的输入电压、输出电流; $v_{x,o}, v_{x,i}$ 和 $i_{x,o}, i_{x,i}$ ($x=p, n$) 分别为各相上、下桥臂的外桥臂和内桥臂电压、电流, p, n 分别代表上、下桥臂。子模块 SM(sub-module) 选用了半桥结构, 如图 7(b) 所示, u_c 为电容器电压, u_{sm} 为 SM 两端的电压, i_{sm} 为流入 SM 的电流。SM 共有闭锁、投入和切除 3 种工作状态, 其中投入状态又分为电容充电和电容放电 2 种模式。图 7(a) 中灰色直线表示直流电流通路(以 SMES 吸收功率为例)。DC-MMC 通过在桥臂中注入交流环流, 使相邻内、外桥臂间进行能量交换, 从而实现桥臂能量的双向流动, 且该种工作方式不需要加装中间变压器, 极大缩减了系统的体积和成本。

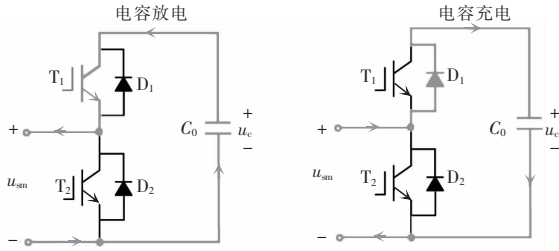
在理想无损耗的情况下, DC-MMC 的电压变比定义为

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (19)$$

当 $0 < D < 1$ 时, 换流器工作在降压模式, 通过增减桥臂的 SM 数量来调节电压变比, 从而实现换流器降压运行。



(a) 采用 DC-MMC 换流器的 SMES 拓扑结构



(b) 子模块电流流向

图 7 采用 DC-MMC 换流器的 SMES 装置

Fig. 7 SMES device with DC-MMC

4.2 超导磁储能装置数学模型

根据图 7(a), 可以列写关于超导磁体的线性化方程, 即

$$L_{smes} \frac{d(\Delta I_{p,1} + \Delta I_{p,2})}{dt} = \Delta V_{out} \quad (20)$$

式中: L_{smes} 为超导磁体电感; $I_{p,1}$ 和 $I_{p,2}$ 为不同相的桥臂输出电流。

DC-MMC 的建模采用平均值建模法, 如图 8 所示, 以单相 DC-MMC 为例进行介绍。基于图 8, DC-MMC 桥臂电容电压动态可以表示为

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c \quad (21)$$

式中: 状态变量 $\mathbf{x}_c = [\Delta v_{p,o} \ \Delta v_{p,i} \ \Delta v_{n,i} \ \Delta v_{n,o}]^T$; 矩阵 $\mathbf{A}_c = \text{diag}(1/C_a \ 1/C_a \ 1/C_a \ 1/C_a)$ 。

由图 8 可以列出关于 DC-MMC 的微分方程

$$\begin{cases} \frac{V_{in}}{2} = v_{p,o} + L_a \frac{di_{p,o}}{dt} + R_a i_{p,o} + (L_l + L_o) \frac{dI_p}{dt} + R_o I_p + \frac{V_{out}}{2} \\ \frac{V_{in}}{2} = v_{n,o} + L_a \frac{di_{n,o}}{dt} + R_a i_{n,o} + (L_l + L_o) \frac{dI_n}{dt} + R_o I_n + \frac{V_{out}}{2} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \frac{V_{in}}{2} = L_a \frac{di_{p,o}}{dt} + L_a \frac{d(i_{p,o} - I_p)}{dt} + R_a (i_{p,o} - I_p) + R_a i_{p,o} + \\ L_s \frac{d(i_{p,o} - i_{n,o} + I_n - I_p)}{dt} + R_s (i_{p,o} - i_{n,o} + I_n - I_p) + v_{p,o} + v_{p,i} \\ \frac{V_{in}}{2} = L_a \frac{di_{n,o}}{dt} + L_a \frac{d(i_{n,o} - I_n)}{dt} + R_a (i_{n,o} - I_n) + R_a i_{n,o} + \\ L_s \frac{d(i_{p,o} - i_{n,o} + I_n - I_p)}{dt} + R_s (i_{p,o} - i_{n,o} + I_n - I_p) + v_{n,o} + v_{n,i} \end{cases} \quad (23)$$

式中: R_a 和 L_a 分别为桥臂等效电阻和电感; R_o 和 L_o 分别为线路的等效电阻和电感; R_s 和 L_s 分别为中性点线路等效电阻和电感; I_p 和 I_n 分别为上、下桥臂的电流。

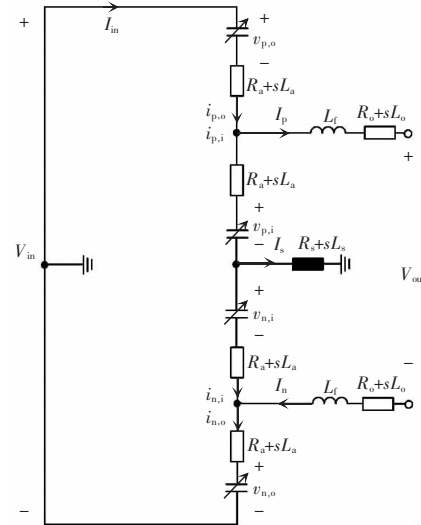


图 8 DC-MMC 平均值模型

Fig. 8 Mean value model of DC-MMC

对式(22)和式(23)进行线性化得到 DC-MMC 的状态空间方程

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{x} = [\Delta i_{p,o} \ \Delta i_{n,o} \ \Delta I_p \ \Delta I_n]^T$;

$$\mathbf{u} = [\Delta V_{in} \ \Delta V_{out} \ \Delta v_{p,o} \ \Delta v_{n,o} \ \Delta v_{n,i} \ \Delta v_{p,i}]^T;$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2L_a + L_s & -L_s & -L_a - L_s & L_s \\ L_s & 2L_a - L_s & L_s & -L_a + L_s \\ L_a & 0 & L_l + L_o & 0 \\ 0 & L_a & 0 & L_l + L_o \end{bmatrix};$$

$$A = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} -2R_a - R_s & R_s & R_a + R_s & -R_s & 0 \\ -R_s & -2R_a + R_s & R_s & R_a - R_s & 0 \\ -R_a & 0 & -R_o & 0 & 0 \\ 0 & -R_a & 0 & 0 & -R_o \end{bmatrix};$$

$$B = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

4.3 超导磁储能装置对系统稳定性的影响

当 VSC 换流站采用定功率控制时, 对外表现出恒功率的负载特性。图 9 为含 VSC 的简单系统线性化等效电路。

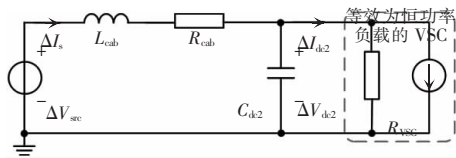


图 9 简化系统的线性化等效电路

Fig. 9 Linearized equivalent circuit for simplified system

根据图 9 的线性化等效电路, 可以列写方程式

$$L_{cab} \frac{d\Delta I_s}{dt} = \Delta V_{src} - \Delta V_{dk2} - R_{cab} \Delta I_s \quad (25)$$

式中: L_{cab} 和 R_{cab} 分别为简化系统的线路等效电感和电阻; V_{src} 为交流电源;。

结合式(3)和式(21), 可以得到线性化系统的状态空间方程

$$\begin{cases} \frac{d\Delta I_s}{dt} = -\frac{R_{cab}}{L_{cab}} \Delta I_s - \frac{1}{L_{cab}} \Delta V_{dk2} + \frac{1}{L_{cab}} \Delta V_{src} \\ \frac{d\Delta V_{dk2}}{dt} = \frac{1}{C_{dk2}} \Delta I_s + \frac{P_{load}}{V_{dc2,0}^2 C_{dk2}} \Delta V_{dk2} \end{cases} \quad (26)$$

式(22)状态空间方程的特征根实部为

$$Re[\lambda] = -\frac{R_{cab}}{2L_{cab}} + \frac{P_{load}}{2V_{dc2,0}^2 C_{dk2}} \quad (27)$$

联合式(4)和式(23)得

$$Re[\lambda] = -\frac{R_{cab}}{2L_{cab}} + \frac{1}{2C_{dk2}} \left(-\frac{1}{R_{VSC2}} \right) \quad (28)$$

定义 SMES 装置的线性化阻抗为

$$Z_{SMES} = \frac{\Delta V_{in}}{\Delta I_{in}} \quad (29)$$

当 SMES 装置投入运行, 相当于在系统换流站

的直流侧并联一条阻抗支路。SMES 装置并联到恒功率负载特性换流站的直流侧, 由于 SMES 的阻抗为正, 因此会削弱换流器对外呈现出的负电阻性质, 使 $Re[\lambda]$ 减小。状态方程的特征根实部减小, 系统特征根在复平面中向左移动, 系统的稳定性由此提高。

通过计算, 当恒功率负载功率为 0.8 p.u. 时, 简化系统状态空间方程的特征根实部 $Re[\lambda]=1.52$, $R_{VSC2}=-1.14$ p.u.; 系统中加入 SMES 装置, SMES 装置等效阻抗为 0.77 p.u., 此时恒功率负载阻抗增加到 2.38 p.u.。对整个柔性直流配电系统的线性化状态空间模型使用 Matlab 进行数值计算, 得到表 3 所示的系统主要振荡模态特征根的相关信息。由表 3 可以看出, 当恒功率负载功率为 0.8 p.u. 时, 加入 SMES 装置, 模态 1 的特征根由复平面的右半平面进入左半平面, 阻尼比增大, 因此可知系统的稳定性提高。

表 3 特征根阻尼参数

Tab. 3 Parameters of eigenvalues and damping

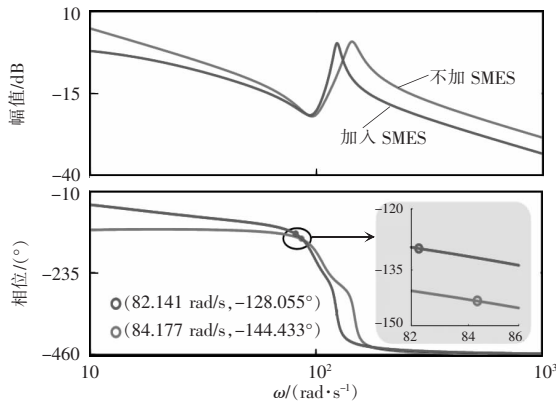
是否加入 SMES	模态	特征根	阻尼比
否	1	0.188±84.8j	-2.21×10 ⁻³
	2	-36±230j	0.155
	3	-4.54±404j	0.0112
是	1	-0.327±84.9j	3.85×10 ⁻³
	2	-36.1±230j	0.155
	3	-4.6±404j	0.0114

在与电网进行功率交换的过程中, SMES 装置正是通过为电网提供附加的阻尼功率来改善系统稳定性, 达到降低直流电压、功率波动的目的。

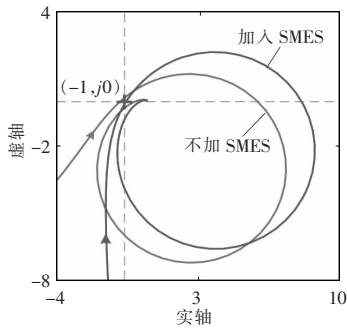
设置换流站 VSC₂ 的恒功率负载功率为 0.8 p.u., 图 10 给出了系统加入和不加 SMES 装置 2 种条件下的频域分析曲线。

从图 10(a) 可以看出, 直流电网加入 SMES 装置后, 改善了 $G_{\varphi}(s)$ Bode 曲线的低频段相位滞后问题, 在开环传递函数穿越 -180° 线时, 相位滞后量减小, 增大了系统的相位裕度。由图 4 可见, 传输功率的变化对 $G_{\varphi}(s)$ 在剪切频率附近的相位影响较大, 因此这里未给出 $G_{\varphi}(s)$ 的 Bode 图。频域响应

的具体参数如表 4 所示。从表 4 中的数据可知,加入 SMES 装置,系统的 $G_{zp}(s)$ 在剪切频率处的相位由 -144.433° 增大到 -128.055° , $G_H(s)$ 的相位裕度由负值 -10.028° 校正到正值 6.274° 。 $G_H(s)$ 的 Nyquist 曲线对比如图 10(b) 所示,结合 Nyquist 判据可判断加入 SMES 装置,系统由失稳变为稳定。



(a) Bode 图



(b) Nyquist 曲线

图 10 SMES 装置提高系统稳定性的频域分析曲线

Fig. 10 Frequency-domain analysis curves for SMES device to improve system stability

表 4 SMES 对系统频域响应参数的影响

Tab. 4 Effect of SMES on parameters for frequency-domain response

是否加入 SMES	剪切频率/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\angle G_{zp}/(^\circ)$	相位裕度/ $(^\circ)$
否	84.177	-144.433	-10.028
是	82.141	-128.055	6.274

由上述分析可知,SMES 装置主要通过增加 $G_{zp}(s)$ 在剪切频率处的相位,增大 $G_H(s)$ 的相位裕度,从而提高系统稳定性。

5 仿真实证

为验证本文所提直流振荡抑制方法的动态性能,在 Matlab/Simulink 中搭建了采用 DC-MMC 换流器的 SMES 装置和柔性直流配电系统的时域仿真模型。

5.1 超导磁储能装置稳态仿真

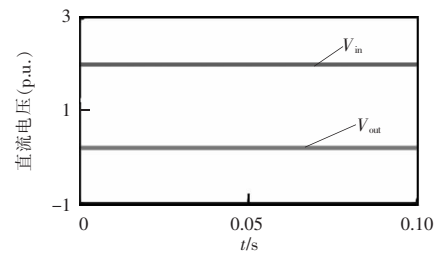
为验证含有 DC-MMC 的 SMES 装置的工作原理,利用理想电压源模拟桥臂电压,忽略子模块电容电压的动态,在 Matlab/Simulink 中搭建了含有两相 DC-MMC 的 SMES 仿真模型,仿真参数见表 5,仿真波形如图 11 所示。

图 11(a) 为 SMES 中 DC-MMC 的输入、输出电压,其中输出电压等于超导磁体两端电压,由

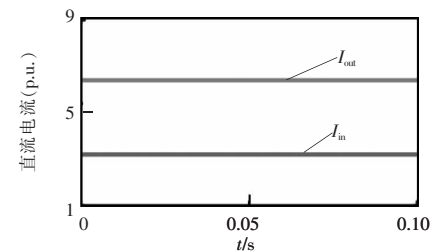
表 5 超导磁储能装置仿真参数

Tab. 5 Simulation parameters of superconducting magnetic energy storage device

参数	数值
电压比 D	0.1
输入电压 V_{in} (p.u.)	2
桥臂电感 L_a /mH	10
子模块电容 C_a /mF	8
中性点电感 L_s /mH	10
滤波电感 L_f /mH	500
超导磁体 L_{smes} /H	5



(a) 直流电压



(b) 直流电流

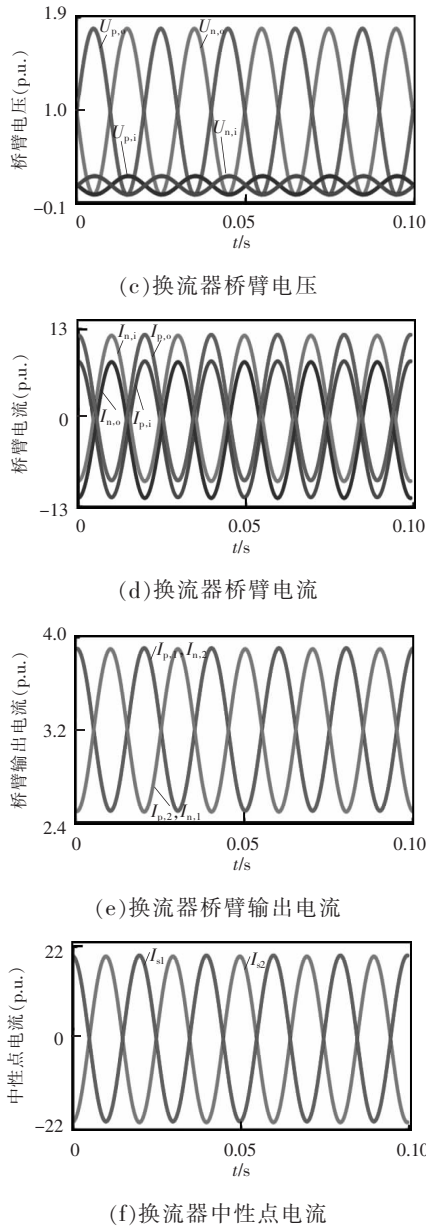


图 11 超导磁储能装置仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms of superconducting magnetic energy storage device

图 11(a)可以看出,输出电压 0.2 p.u. 低于输入电压 2.0 p.u.;图 11(b)为 SMES 中换流器输入、输出电流波形,电流波形仅包含直流分量;图 11(e)为两相桥臂输出电流波形,由于两相电流相位相反,纹波分量互相抵消,所以换流器输出电流仅包含直流分量。

上述仿真结果验证了本文研究的含 DC-MMC 的 SMES 装置在调节 DC/DC 换流器输出电压作用上的有效性。

5.2 SMES 装置对配电系统稳定性影响仿真验证

在 Simulink 中搭建含有 SMES 装置的柔性直流配电系统,通过时域仿真验证了本文所提 SMES 装置提高系统稳定性的正确性与有效性。图 12 为时域仿真波形,在 $t=1$ s 时,恒功率负载功率由 0.5 p.u. 增加到 0.8 p.u.。时域仿真结果表明,加入 SMES 装置对系统的扰动起到了明显的抑制作用,系统在扰动后经过一段时间能够恢复到稳定运行状态,对系统的稳定性起到了很好的改善作用。

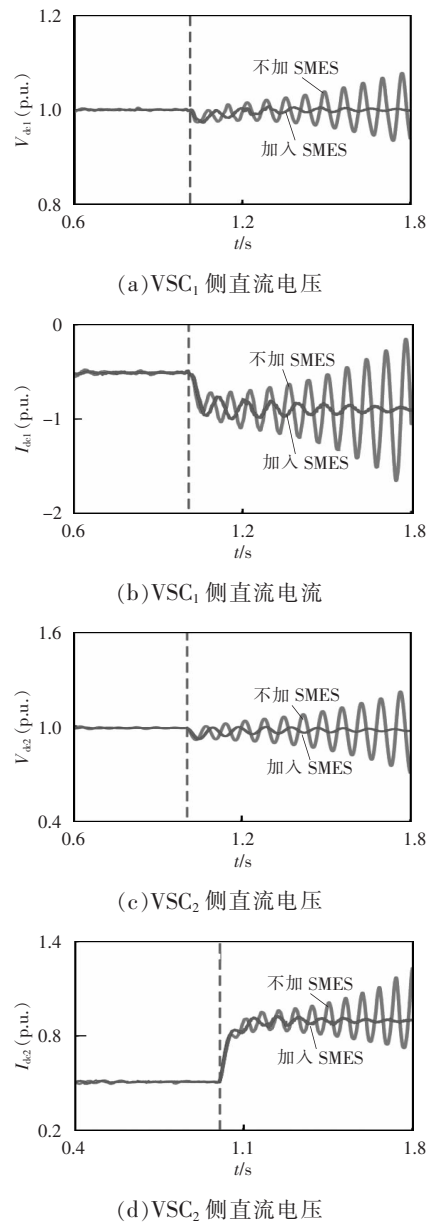


图 12 SMES 装置提高系统稳定性仿真结果

Fig. 12 Simulation results of SMES device to improve system stability

6 结论

本文针对柔性直流配电系统在运行过程中存在的稳定性问题,通过直流电网并联 SMES 装置来提高系统稳定性,保证系统稳定运行。为适应宽范围电压场合的应用,SMES 装置采用了一种模块化多电平 DC/DC 换流器,并得出以下结论。

(1)SMES 装置能够为直流电网提供正阻尼,增大系统开环传递函数在剪切频率处的相位裕度,从而减小换流站恒功率负载特性对系统稳定性的不利影响,对提高柔性直流配电系统的稳定性具有研究意义。

(2)采用 DC-MMC 的 SMES 装置能通过 DC/DC 换流器桥臂投入的 SM 数量来降低超导磁体两端的电压,适用于不同电压等级的电力系统。

(3)目前 SMES 装置成本较高,研究 SMES 装置以降低造价也是其进一步发展需重点关注的内容。

参考文献:

- [1] 李鲁阳,裴玮,孔力. 基于电压源型换流器的多端直流配电系统降阶小信号模型[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1187-1196.
Li Luyang, Pei Wei, Kong Li. Reduced-order small signal model of voltage source converter based multi-terminal distribution network [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1187-1196 (in Chinese).
- [2] 伍文华,陈燕东,罗安,等. 海岛 VSC-HVDC 输电系统直流阻抗建模、振荡分析与抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4359-4368, 4636.
Wu Wenhua, Chen Yandong, Luo An, et al. DC impedance modeling, oscillation analysis and suppression method for VSC-HVDC system in the field of islands power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4359-4368, 4636 (in Chinese).
- [3] Yu Xiaoyan, Salato M. An optimal minimum-component DC-DC converter input filter design and its stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 829-840.
- [4] 张剑,肖湘宁. 并联型无源与有源次同步振荡阻尼装置对比分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 77-82.
Zhang Jian, Xiao Xiangning. Comparative analysis between parallel-type passive and active subsynchronous oscillation damping devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 77-82 (in Chinese).
- [5] 朱琳,贺之渊,吴学光,等. 渝鄂背靠背柔性直流附加控制对系统稳定性的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2519-2527.
Zhu Lin, He Zhiyuan, Wu Xueguang, et al. Influence of additional control strategy of back-to-back VSC-HVDC on system stability [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2519-2527 (in Chinese).
- [6] 马文忠,周冠宇,孙鹏,等. 考虑直流断路器的 VSC-MTDC 系统鲁棒阻尼控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 84-91.
Ma Wenzhong, Zhou Guanyu, Sun Peng, et al. Design of robust damping controller for VSC-MTDC system considering DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power System, 2020, 44(6): 84-91 (in Chinese).
- [7] 朱晓荣,韩丹慧,孟凡奇,等. 提高直流微电网稳定性的并网换流器串联虚拟阻抗方法[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4523-4531.
Zhu Xiaorong, Han Danhui, Meng Fanqi, et al. Grid converter series virtual impedance method for improving DC microgrid stability [J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4523-4531 (in Chinese).
- [8] 林海雪. 现代储能技术应用概况及展望[J]. 电源学报, 2015, 13(5): 34-40, 47.
Lin Haixue. Applying situation and prospects of modern energy storage technology [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(5): 34-40, 47 (in Chinese).
- [9] 熊连松,修连成,王慧敏,等. 储能系统抑制电网功率振荡的机理研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4373-4380.
Xiong Liansong, Xiu Liancheng, Wang Huimin, et al. Mechanism of energy system to suppress grid power to oscillations [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4373-4380 (in Chinese).
- [10] 林晓冬,雷勇. SMES/BESS 储能变流器在微电网中的控制策略研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1458-1466.
Lin Xiaodong, Lei Yong. Research on control strategy of SMES/BESS energy storage converters in microgrid [J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1458-1466 (in Chinese).

- [11] 申明, 张晓斌. 含直流储能的双端柔性直流输电技术提高微网并网稳定运行能力的研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(3): 528-535.
- Shen Ming, Zhang Xiaobin. Research on VSC-LVDC with DC energy storage to improve the stability of microgrid connected to grid operation [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(3): 528-535 (in Chinese).
- [12] 邓汇娟, 张铁山, 周小光, 等. 超导储能蓄电池混合储能在风力发电中的应用[J]. 电源学报, 2013, 11(1): 25-29.
- Deng Huijuan, Zhang Tieshan, Zhou Xiaoguang, et al. Application of hybrid energy storage system with superconducting magnetic energy storage battery in wind power generation [J]. Journal of Power Supply, 2013, 11(1): 25-29 (in Chinese).
- [13] Khanna R, Singh G, Nagsarkar T K. Power system stability enhancement with SMES [C]// 2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation. Thrisur, India, 2012: 1-6.
- [14] 马文忠, 丁安敏, 周冠宇, 等. 基于超导磁储能装置的 MMC-HVDC 系统直流振荡抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 184-190, 210.
- Ma Wenzhong, Ding Anmin, Zhou Guanyu, et al. Superconducting magnetic energy storage based DC oscillation mitigation in MMC-HVDC systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 184-190, 210 (in Chinese).
- [15] 潘生雄, 赵霞, 罗映红, 等. 基于 SMES/BESS 混合储能抑制风电功率波动的控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 101-106.
- Pan Shengxiong, Zhao Xia, Luo Yinghong, et al. Control strategy for suppressing wind power fluctuation based on SMES/BESS hybrid energy storage [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 101-106 (in Chinese).
- [16] 徐志奇, 艾宪仓, 王云, 等. SMES 变流器基于自抗扰的改进型模型预测控制[J]. 低温与超导, 2020, 48(8): 26-34.
- Xu Zhiqi, Ai Xiancang, Wang Yun, et al. Improved model predictive control based on auto disturbance rejection control for SMES converter [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(8): 26-34 (in Chinese).
- [17] 罗仁和, 雷勇, 林晓冬, 等. 基于无差拍控制的超导磁储能系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(1): 10-15.
- Luo Renhe, Lei Yong, Lin Xiaodong, et al. Superconducting magnetic energy storage system based on deadbeat control [J]. Automation & Instrumentation, 2020(1): 10-15 (in Chinese).
- [18] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8-15.
- Li Bin, Bao Hailong, Guo Li. Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 8-15 (in Chinese).
- [19] Alafnan H, Zhang Min, Yuan Weijia, et al. Stability improvement of DC power systems in an all-electric ship using hybrid SMES/battery [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-6.
- [20] Shim J W, Cho Y, Kim S, et al. Synergistic control of SMES and battery energy storage for enabling dispatchability of renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5701205.
- [21] 陈宇, 韩民晓, 王皓界, 等. 基于模块化三电平方式的中压直流配电网 DC/DC 换流器设计[J]. 电力建设, 2016, 37(5): 69-77.
- Chen Yu, Han Minxiao, Wang Haojie, et al. DC/DC converter design of MVDC distribution network based on modular three-level [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 69-77 (in Chinese).
- [22] 史书怀, 王丰, 朱彦霖, 等. 基于 MMC 的高电压比直流变压器调制策略研究[J]. 电源学报, 2017, 15(5): 10-15.
- Shi Shuhuai, Wang Feng, Zhu Yanlin, et al. Research on modulation strategy of high voltage ratio MMC based DC transformer [J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(5): 10-15 (in Chinese).
- [23] Engel S P, Stieneker M, Soltan N, et al. Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 124-137.
- [24] Robinson J, Jovcic D, Joós G. Analysis and design of an offshore wind farm using a MV DC grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2164-2173.
- [25] Jovcic D, Zhang Lu. LCL DC/DC converter for dc grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2071-2079.

- [26] Lin Weixing. DC-DC autotransformer with bidirectional DC fault isolating capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5400-5410.
- [27] Yang Heng, Qin Jiangechao, Debnath S, et al. Phasor domain steady-state modeling and design of the DC-DC modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2054-2063.
- [28] 张学, 裴玮, 邓卫, 等. 含恒功率负载的交直流混联配电系统稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5572-5582, 5834.
- Zhang Xue, Pei Wei, Deng Wei, et al. Stability analysis of AC/DC hybrid distribution system with constant power loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5572-5582, 5834 (in Chinese).



李 岚

作者简介:

李岚(1969-),女,本科,高级工程师。研究方向:自动控制技术。E-mail:winning99@tom.com。

丁安敏(1996-),女,博士研究生。研究方向:柔直系统稳定性分析与控制。E-mail:2267990067@qq.com。

田洪英(1996-),女,硕士。研究方向:高压大功率DC/DC变换器。E-mail:771404195@qq.com。

张彦(1967-),男,博士。研究方向:自动控制技术。E-mail:wenweimine@sina.com。

张奎同(1983-),男,硕士。研究方向:自动控制技术。E-mail:19960009@upc.edu.cn。

马文忠(1968-),男,通信作者,博士,教授。研究方向:电力系统、电力电子技术。E-mail:mawenzhong@126.com。



来源:黑龙江省公益广告研究基地