

DOI: 10.7667/PSPC180083

低压交直流混合配电系统线性化建模方法

成龙¹, 訾士才², 唐凯³, 王振浩¹, 李国庆¹

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网新源敦化抽水蓄能有限公司, 吉林 敦化 133700;
3. 吉林石化公司合成树脂厂, 吉林 吉林 132021)

摘要: 线性化模型是直流系统稳定性分析、接口耦合机理研究及控制器设计的基础。将含多直流微网的辐射状交直流混合配电系统分为整流接口及所连交流主网、逆变接口及所连无源交流系统、并网接口及所连直流微网以及直流网络4个部分, 建立灵活的同步旋转坐标系。分别推导系统各部分在发生小扰动下的暂态数学模型。采用一种含控制标识位的接口控制器线性化建模方法, 并引入锁相环控制, 建立系统的全局线性化模型, 提高了模型在不同应用场景下的普适性。通过与电磁暂态模型进行对比分析, 验证了所建立的交直流混合配电系统全局线性化模型的正确性和有效性。

关键词: 交直流混合; 配电系统; 接口控制; 线性化建模

A linearized modeling method of low voltage hybrid AC and DC distribution system

CHENG Long¹, ZI Shicai², TANG Kai³, WANG Zhenhao¹, LI Guoqing¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. Dunhua Pumped Storage Limited Company, State Grid Xinyuan Company Ltd, Dunhua 133700, China;
3. Synthetic Resin Factory of Jilin Petrification Company, China Petroleum, Jilin 132021, China)

Abstract: The linearization model is the basis of stability analysis, interface coupling mechanism research and controller design for DC power system. A radial hybrid AC and DC power distribution system with multiple DC micro-grids is divided into 4 parts, including rectifier interface and the AC main network, inverter interface and the passive AC system, the grid-connected interface and DC micro-grids, and the DC network. The transient mathematical models of each part of the system under small perturbations are respectively deduced through establishing a flexible $d-q$ synchronous reference frame. In order to improve the universality of the model in different application scenarios, a linearized modeling method of the interface controller with control identification bits and the phase locked loop control are introduced to establish a global linear system model. By comparing with the electromagnetic transient model, the correctness and validity of the global linear model of the hybrid AC and DC distribution power system are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677023).

Key words: hybrid AC and DC; distribution power system; interface control; linearized modeling

0 引言

配电网处于电力系统的末端, 直接面向电力用户, 承担着电能分配、供给电力消费、服务客户的重任^[1-3]。随着新能源、新材料, 以及电力电子技术的快速发展与广泛应用, 先进功率器件不断更新换代, 用户对供电质量、供电可靠性以及系统运行效率等方面的要求日益提高, 现有交流配电网正面临

用电需求定制化和多样化、分布式发电接入规模化、潮流协调控制复杂化等多方面的巨大挑战^[4-5]。与传统交流配电系统相比, 基于大功率、高功率密度功率变换环节的直流配电系统不涉及无功调节及对电压的频率和相位进行跟踪等问题, 可控性和可靠性大大提高^[6-8], 深入开展直流配电系统相关研究将对推动智能配电技术的发展影响深远^[9-10]。

配电系统根本结构性变革的最终目标是实现以纯直流环网为主体的新型智能配电系统, 但过程中必然要经过交直流网络共存的过渡阶段^[11-13]。交直

流混合配电技术是新能源并网和远距离大容量电能传输的有效手段, 对其进行精确的数学解析建模是交直流混合系统动态特性和小信号稳定性分析的关键, 也为系统电气参数和控制参数的设计提供了重要参考^[14-16]。文献[17]采用状态空间法, 建立了不受交流系统强度约束的双端柔性直流输电系统小信号模型; 文献[18]建立了适用于多种应用场景的多端柔性直流输电系统小信号模型, 并进行了系统稳定性分析; 文献[19]研究了四端柔性直流输电系统动态建模方法, 其中忽略了锁相环等必要环节; 文献[20]研究了采用间接电流控制的双端柔性直流输电系统小信号模型, 并提出一种基于极点配置法的附加阻尼控制策略。现有文献多以柔性直流输电系统为研究对象, 未见交直流混合配电系统线性化建模方面的相关研究。

本文将含多直流微网的交直流混合配电系统分为整流接口及所连交流主网、逆变接口及所连无源交流系统、并网接口及所连直流微网和独立储能站以及直流网络 4 个部分, 选择灵活的同步旋转坐标系, 推导小扰动下的暂态数学模型, 结合接口控制器建模, 建立系统的全局线性化模型。为简化模型, 设交流系统为仅考虑其基频分量的三相平衡系统, 并根据各接口的不同运行控制方式, 采用一种含控制标识位的控制器建模方法, 使其具有较高的普适性, 并通过与电磁暂态模型的仿真对比, 验证所建立线性化模型的正确性。

1 低压混合配电系统结构

目前, 配电系统结构主要包括环状、双端供电和放射状 3 种形式。本文采用的含多直流微网的放射状混合配电系统结构如图 1 所示。各微网分别通过并网接口并联接入直流配电母线, 交流主网和无源交流系统分别通过整流、逆变接口与直流网络连接。其中, 公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)电压为 \dot{U}_s , 相角为 θ , 无源交流系统输入电压为 \dot{U}_D , 相角为 δ , 各直流微网出口电压为 U_{Mn} 。系统中所有功率接口均设定为两电平结构, 线路均考虑为有损线路。

2 系统线性建模方法

2.1 整流接口及所连交流主网线性化建模

整流接口及所连交流主网等效结构如图 2 所示。交流主网由理想电压源等效, 其电压向量为 $\dot{E} \angle 0^\circ$, 内阻抗为 $R_1 + jX_1$; PCC 电压向量为 $\dot{U}_s \angle \theta$, 电流向量为 $\dot{I}_s \angle \psi$; 连接电抗器及变压器的等效电

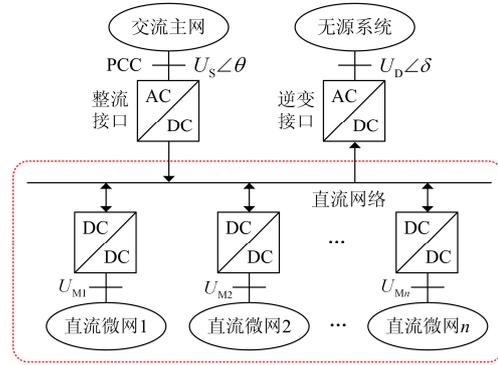


图 1 混合配电系统结构

Fig. 1 Structure of mixed distribution system

阻和漏感分别为 R_s 和 L_s ; 整流接口交流侧电压向量为 $\dot{U}_R \angle \varphi$; 整流接口出口电压、电流分别为 U_{dc1} 、 I_{dc1} , 电容为 C 。建立以等效理想电压源电压向量 \dot{E} 为基准的同步旋转坐标系如图 3 所示。在忽略换流器损耗的情况下, 推导该坐标系下交流主网及整流接口交流侧的暂态数学模型为式(1)、式(2)。式中: i_{sd} 、 i_{sq} 和 u_{sd} 、 u_{sq} 分别为 PCC 电流向量 \dot{I}_s 和电压向量 \dot{U}_s 在该坐标系下的 d 轴、 q 轴分量; u_{rd} 、 u_{rq} 分别为电压向量 \dot{U}_R 在该坐标系下的 d 轴、 q 轴分量。

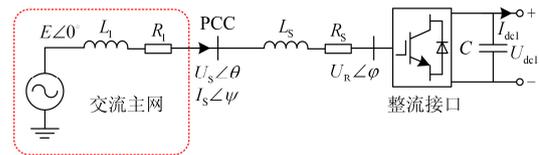


图 2 整流接口及所连交流主网等效结构

Fig. 2 Structure of rectifier and AC main grid

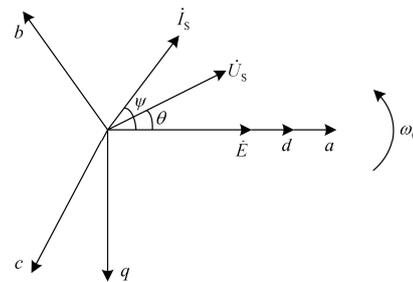


图 3 以 \dot{E} 为基准的同步旋转坐标系

Fig. 3 d - q synchronous reference frame based on \dot{E}

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{sd}}{dt} = -R_1 i_{sd} - \omega_0 L_1 i_{sq} + E - u_{sd} \\ L_1 \frac{di_{sq}}{dt} = -R_1 i_{sq} + \omega_0 L_1 i_{sd} + 0 - u_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_S \frac{di_{Sd}}{dt} = -R_S i_{Sd} - \omega_0 L_S i_{Sq} + u_{Sd} - u_{Rd} \\ L_S \frac{di_{Sq}}{dt} = -R_S i_{Sq} + \omega_0 L_S i_{Sd} + u_{Sq} - u_{Rq} \\ C \frac{dU_{dc1}}{dt} = \frac{3(u_{Rd0} i_{Sd} + u_{Rq0} i_{Sq})}{2U_{dc1}} - I_{dc1} \end{cases} \quad (2)$$

在系统发生小扰动时, 将式(1)、式(2)联立并线性化, 得到整流接口及所连交流主网线性化模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{Sd} \\ \Delta i_{Sq} \\ \Delta U_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1 + R_S}{L_1 + L_S} & -\omega_0 & 0 \\ \omega_0 & -\frac{R_1 + R_S}{L_1 + L_S} & 0 \\ \frac{3u_{Rd0}}{2CU_{dc10}} & \frac{3u_{Rq0}}{2CU_{dc10}} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{Sd} \\ \Delta i_{Sq} \\ \Delta U_{dc1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u_{Rd} \\ \Delta u_{Rq} \\ \Delta U_{dc1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1 + L_S} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_1 + L_S} & 0 \\ \frac{3i_{Sd0}}{2CU_{dc10}} & \frac{3i_{Sq0}}{2CU_{dc10}} & \frac{3(u_{Rd0} i_{Sd0} + u_{Rq0} i_{Sq0})}{2C^2 U_{dc10}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{Rd} \\ \Delta u_{Rq} \\ \Delta U_{dc1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, i_{Sd0} 等下标含有“0”的为其稳态工作点的值, 下同。

控制器是混合配电系统的核心组成部分, 是保证系统安全稳定运行的基础, 且控制器中全部反馈量的 Park 变换均以其自身输出量为参考。混合配电系统的控制器主要包括锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)和电流矢量控制器两部分。其中 PLL 主要用于跟踪交流主网同步相位, 并为控制器提供相位参考。PLL 控制框图如图 4 所示。

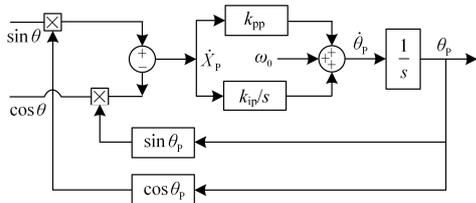


图 4 PLL 控制框图

Fig. 4 Structure of PLL control

图中: θ 为交流主网电压 \dot{U}_S 的初相; θ_p 为 PLL 的输出初相。故 PLL 的基本控制原理为

$$\theta_p = \int \left[(k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s}) \sin(\theta - \theta_p) + \omega_0 \right] dt \quad (4)$$

PLL 线性化模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta X_p \\ \Delta \theta_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ k_{ip} & k_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_p \\ \Delta \theta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_{Sq}}{u_S^2} & \frac{u_{Sd}}{u_S^2} \\ k_{pp} \frac{u_{Sq}}{u_S^2} & -k_{pp} \frac{u_{Sd}}{u_S^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{Sd} \\ \Delta U_{Sq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, u_S 为 PCC 相电压幅值。

整流接口的电流矢量控制为双闭环结构, 内环采用电流解耦控制, 外环则采用直流电压及无功控制, 其控制结构如图 5 所示。图中, U_{dc1}^* 和 Q_S^* 分别为直流电压及系统无功功率参考值; Q_S 为交流主网无功功率; i_{Sd}^* 和 i_{Sq}^* 分别为 PCC 电流向量 \dot{i}_S 的 dq 轴分量参考值; u_{Rd}^* 和 u_{Rq}^* 分别为控制器输出调制信号的 dq 轴分量参考值。

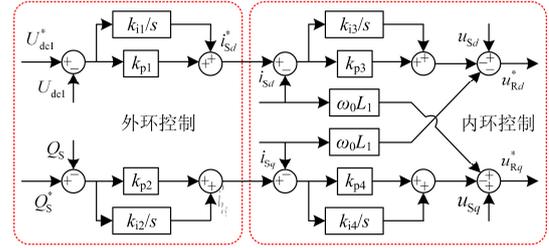


图 5 直流电压及无功功率控制框图

Fig. 5 Structure of DC voltage and reactive power control

外环直流电压及无功功率控制可表示为

$$i_{Sd}^* = \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) (U_{dc1}^* - U_{dc1}) \quad (6)$$

$$i_{Sq}^* = \left(k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) (Q_S^* - Q_S) \quad (7)$$

在以 \dot{E} 为基准的同步旋转坐标系下:

$$Q_S = \frac{3}{2} (u_{Sd} i_{Sq} - u_{Sq} i_{Sd}) \quad (8)$$

设定:

$$\frac{d\Delta z_1}{dt} = \Delta U_{dc1}^* - \Delta U_{dc1} \quad (9)$$

$$\frac{d\Delta z_2}{dt} = \Delta Q_S^* - \Delta Q_S \quad (10)$$

对式(6)~式(8)线性化, 得到整流接口外环控制器线性化方程为

$$\Delta i_{Sd}^* = -k_{p1} \Delta U_{dc1} + \frac{k_{i1}}{s} (\Delta U_{dc1}^* - \Delta U_{dc1}) + k_{p1} \Delta U_{dc1}^* \quad (11)$$

$$\Delta i_{Sq}^* = \frac{3}{2} k_{p2} i_{Sd0} \Delta u_{Sq} - \frac{3}{2} k_{p2} i_{Sq0} \Delta u_{Sd} - \frac{3}{2} k_{p2} u_{Sd0} \Delta i_{Sq} - \frac{3}{2} k_{p2} u_{Sq0} \Delta i_{Sd} + \frac{k_{i2}}{s} (\Delta Q_S^* - \Delta Q_S) + k_{p2} \Delta Q_S^* \quad (12)$$

内环电流解耦控制可表示为

$$u_{Rd}^* = u_{Sd} - \omega_0 L_1 i_{Sq} - \left(k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} \right) (i_{Sd}^* - i_{Sd}) \quad (13)$$

$$u_{Rq}^* = u_{Sq} + \omega_0 L_1 i_{Sd} - \left(k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \right) (i_{Sq}^* - i_{Sq}) \quad (14)$$

经换流器惯性环节输出的调制信号与其交流侧电压之间的对应关系为

$$\frac{u_{Rd}}{u_{Rd}^*} = \frac{K_1}{T_\delta s + 1} \quad (15)$$

$$\frac{u_{Rq}}{u_{Rq}^*} = \frac{K_1}{T_\delta s + 1} \quad (16)$$

式中: K_1 为整流接口增益; T_δ 为换流器开关周期。脉冲宽度调制(Pulse With Modulation, PWM)过程中, 调制度 $M = u_R^* / S = u_R / U_{dc10}$, S 为三角载波幅值, u_R^* 为调制波电压参考值, 则整流器增益 $K_1 = U_{dc10} / S$ 。设定:

$$\frac{d\Delta z_3}{dt} = \Delta i_{Sd}^* - \Delta i_{Sd} \quad (17)$$

$$\frac{d\Delta z_4}{dt} = \Delta i_{Sq}^* - \Delta i_{Sq} \quad (18)$$

将式(13)—式(16)联立并线性化, 得到整流接口内环控制器线性化模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{Rd}^* \\ \Delta u_{Rq}^* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} & 0 \\ 0 & k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{Sd}^* \\ \Delta i_{Sq}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{p3} + \frac{k_{i3}}{s} & -\omega_0 L_1 \\ \omega_0 L_1 & k_{p4} + \frac{k_{i4}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{Sd} \\ \Delta i_{Sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{Sd} \\ \Delta u_{Sq} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta u_{Rd} \\ \Delta u_{Rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{T_\delta} & 0 \\ 0 & \frac{K_1}{T_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{Rd}^* \\ \Delta u_{Rq}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\delta} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{Rd} \\ \Delta u_{Rq} \end{bmatrix} \quad (20)$$

联立式(3)、式(5)、式(11)、式(12)以及式(19)、式(20), 即可得到整流接口及所连交流主网和接口控制器线性化模型。

2.2 逆变接口及所连无源交流系统线性化建模

逆变接口及所连无源交流系统等效结构如图 6 所示。无源交流系统由电阻 R_2 和电感 L_2 等效, 其出口电压向量为 $\dot{U}_D \angle \delta$, 电流向量为 $\dot{I}_D \angle \sigma$; 连接电抗器的等效电阻和电感分别为 R_D 和 L_D ; 逆变接

口交流侧电压向量为 $\dot{U}_1 \angle \eta$; 直流母线电压、电流分别为 U_{dc2} 、 I_{dc2} 。由于受端交流系统不存在电源, 无法通过 PLL 获得 Park 变换所需的电网同步相位, 因此引入三相理想电压源作为控制器的相位参考。在该坐标系下, 无源交流系统及逆变站交流侧的暂态数学模型为

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_{Dd}}{dt} = -R_2 i_{Dd} - \omega_0 L_2 i_{Dq} - u_{Dd} \\ L_2 \frac{di_{Dq}}{dt} = -R_2 i_{Dq} + \omega_0 L_2 i_{Dd} - u_{Dq} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} L_D \frac{di_{Dd}}{dt} = -R_D i_{Dd} - \omega_0 L_D i_{Dq} + u_{Dd} - u_{1d} \\ L_D \frac{di_{Dq}}{dt} = -R_D i_{Dq} + \omega_0 L_D i_{Dd} + u_{Dq} - u_{1q} \\ C \frac{dU_{dc2}}{dt} = \frac{3(u_{1d} i_{Dd} + u_{1q} i_{Dq})}{2U_{dc2}} - I_{dc2} \end{cases} \quad (22)$$

式中: i_{Dd} 、 i_{Dq} 和 u_{Dd} 、 u_{Dq} 分别为电流向量 \dot{I}_D 和电压向量 \dot{U}_D 在该坐标系下的 d 轴、 q 轴分量; u_{1d} 、 u_{1q} 分别为电压向量 \dot{U}_1 在该坐标系下的 d 轴、 q 轴分量。

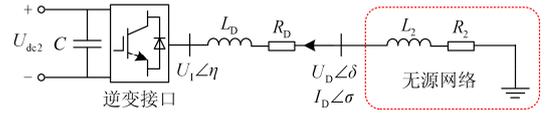


图 6 逆变接口及所连无源交流系统等效结构

Fig. 6 Equivalent structure of inverter interface and passive AC system

在系统发生小扰动时, 将式(21)、式(22)联立并线性化, 得到逆变接口及所连无源交流系统线性化模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_{Dd} \\ \Delta i_{Dq} \\ \Delta U_{dc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_2 + R_D}{L_2 + L_D} & -\omega_0 & 0 \\ \omega_0 & -\frac{R_2 + R_D}{L_2 + L_D} & 0 \\ \frac{3u_{1d0}}{2CU_{dc20}} & \frac{3u_{1q0}}{2CU_{dc20}} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{Dd} \\ \Delta i_{Dq} \\ \Delta U_{dc2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_2 + L_D} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_2 + L_D} & 0 \\ \frac{3i_{Dd0}}{2CU_{dc20}} & \frac{3i_{Dq0}}{2CU_{dc20}} & \frac{3(u_{1d0} i_{Dd0} + u_{1q0} i_{Dq0})}{2C^2 U_{dc20}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{1d} \\ \Delta u_{1q} \\ \Delta U_{dc2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

逆变接口的电流矢量控制为单闭环结构的电流解耦控制,其控制结构如图7所示。图中, u_{Dd}^* 、 u_{Dq}^* 和 u_{1d}^* 、 u_{1q}^* 分别为电压 u_{Dd} 、 u_{Dq} 和 u_{1d} 、 u_{1q} 的参考值。

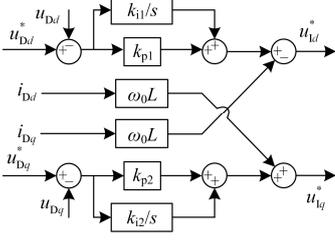


图7 交流电压控制框图

Fig. 7 Structure of AC voltage control

图7所示结构控制原理可表示为

$$u_{1d}^* = -\omega_0 L_2 i_{Dq}^* - \left(k_{p5} + \frac{k_{i5}}{s} \right) (u_{Dd}^* - u_{Dd}) \quad (24)$$

$$u_{1q}^* = \omega_0 L_2 i_{Dd}^* - \left(k_{p6} + \frac{k_{i6}}{s} \right) (u_{Dq}^* - i_{Dq}^*) \quad (25)$$

又有:

$$\frac{u_{1d}^*}{u_{1d}^*} = \frac{K_2}{T_\delta s + 1} \quad (26)$$

$$\frac{u_{1q}^*}{u_{1q}^*} = \frac{K_2}{T_\delta s + 1} \quad (27)$$

式中, 逆变器增益 $K_2 = U_{dc20} / S$ 。

设定:

$$\frac{d\Delta z_5}{dt} = \Delta u_{Dd}^* - \Delta u_{Dd} \quad (28)$$

$$\frac{d\Delta z_6}{dt} = \Delta u_{Dq}^* - \Delta u_{Dq} \quad (29)$$

对式(24)—式(27)线性化, 得到逆变接口控制器线性化模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{1d}^* \\ \Delta u_{1q}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(k_{p5} + \frac{k_{i5}}{s} \right) & 0 \\ 0 & -\left(k_{p6} + \frac{k_{i6}}{s} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{Dd}^* \\ \Delta u_{Dq}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 L_2 \\ \omega_0 L_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{Dd} \\ \Delta i_{Dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{p5} + \frac{k_{i5}}{s} & 0 \\ 0 & k_{p6} + \frac{k_{i6}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{Dd} \\ \Delta u_{Dq} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta u_{1d} \\ \Delta u_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_2}{T_\delta} & 0 \\ 0 & \frac{K_2}{T_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{1d}^* \\ \Delta u_{1q}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\delta} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{1d} \\ \Delta u_{1q} \end{bmatrix} \quad (31)$$

2.3 并网接口及所连直流微网和储能站线性化模型

实际上, 各微网内包含通过各自接口电路接入微网直流母线的微源(Micro Resource, MR)及储能装置(Energy Storage Device, ESD)。在理想运行方式下, 各微网出口侧直流电压 U_{Mi} 由其内部 MR 和 ESD 共同维持。当混合配电系统由并网转为孤岛运行, 或各微网自身调节裕度不足时, 分别由对应并网接口负责维持接口出口侧直流电压 $U_{Mdc i}$ 及各微网出口侧直流电压 U_{Mi} 稳定。为简化建模过程, 本文不考虑各微网内部的具体结构及接口控制逻辑, 仅考虑并网接口调控作用的并网接口及所连直流微网等效结构如图8所示。

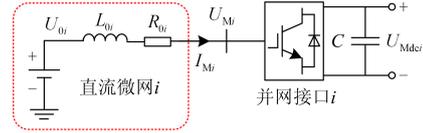


图8 并网接口及所连直流微网和储能站等效结构

Fig. 8 Structure of grid-connected interface and DC microgrid or independent energy storage station

各直流微网和独立储能站由理想直流源等效, 其设计电压为 U_{0i} , 等效电阻和电感分别为 R_{0i} 、 L_{0i} ; 各微网或储能站出口侧直流电流为 I_{Mi} ; $i=1,2,\dots,n$ 。则并网接口及所连直流微网和独立储能站暂态数学模型为

$$\begin{cases} L_{0i} \frac{dI_{Mi}}{dt} = -R_{0i} I_{Mi} + U_{0i} - U_{Mi} \\ C \frac{dU_{Mdc i}}{dt} = \frac{U_{Mi} I_{Mi}}{U_{Mdc i}} - I_{Mdc i} \end{cases} \quad (32)$$

式中, $U_{Mdc i}$ 、 $I_{Mdc i}$ 分别为并网接口输出电压、电流。

将式(32)线性化, 得到并网接口及所连直流微网和独立储能站线性化模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta I_{Mi} \\ \Delta U_{Mdc i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{0i}}{L_{0i}} & 0 \\ \frac{U_{Mi0}}{CU_{Mdc i0}} & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{Mi} \\ \Delta U_{Mdc i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{0i}} & 0 \\ \frac{I_{Mi0}}{CU_{Mdc i}} & \frac{U_{Mi0} I_{Mi0}}{C^2 U_{Mdc i0}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{Mi} \\ \Delta U_{Mdc i} \end{bmatrix} \quad (33)$$

并网接口的电流矢量控制采用双闭环结构, 并引入控制标识位, 以保证接口在系统不同运行方式下的对应控制模式使能, 其控制结构如图9所示。

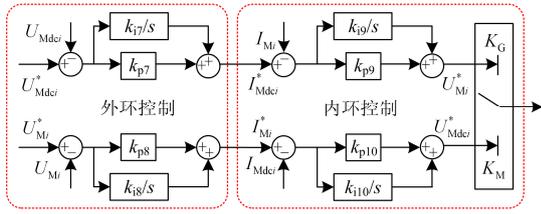


图 9 直流电压控制框图

Fig. 9 Structure of DC voltage control

图中: $U_{Mdc i}^*$ 、 $I_{Mdc i}^*$ 和 $U_{M i}^*$ 、 $I_{M i}^*$ 分别为 $U_{Mdc i}$ 、 $I_{Mdc i}$ 和 $U_{M i}$ 、 $I_{M i}$ 的参考值; K_G 、 K_M 为控制标识系数。

当混合配电系统由并网转为孤岛运行, 即 $K_G=1$ 、 $K_M=0$ 时, 定 $U_{Mdc i}$ 控制模式使能; 当各微网自身调节裕度不足, 即 $K_G=0$ 、 $K_M=1$ 时, 定 $U_{M i}$ 控制模式使能。 K_G 、 K_M 不能同时取 1 或取 0。

按图 9 所示结构, 外环直流电压控制可表示为

$$I_{Mdc i}^* = \left(k_{p7} + \frac{k_{i7}}{s} \right) (U_{Mdc i}^* - U_{Mdc i}) \quad (34)$$

$$I_{M i}^* = \left(k_{p8} + \frac{k_{i8}}{s} \right) (U_{M i}^* - U_{M i}) \quad (35)$$

设定:

$$\frac{d\Delta z_7}{dt} = \Delta U_{Mdc i}^* - \Delta U_{Mdc i} \quad (36)$$

$$\frac{d\Delta z_8}{dt} = \Delta U_{M i}^* - \Delta U_{M i} \quad (37)$$

内环电流控制可表示为

$$U_{M i}^* = \left(k_{p9} + \frac{k_{i9}}{s} \right) (I_{Mdc i}^* - I_{M i}) \quad (38)$$

$$U_{Mdc i}^* = \left(k_{p10} + \frac{k_{i10}}{s} \right) (I_{M i}^* - I_{Mdc i}) \quad (39)$$

又有

$$\frac{U_{M i}}{U_{M i}^*} = \frac{K_{3i}}{T_\delta s + 1} \quad (40)$$

$$\frac{U_{Mdc i}}{U_{Mdc i}^*} = \frac{K_{3i}}{T_\delta s + 1} \quad (41)$$

式中, 并网接口增益 $K_{3i} = U_{Mdc i0} / S$ 。

设定:

$$\frac{d\Delta z_9}{dt} = \Delta I_{Mdc i}^* - \Delta I_{M i} \quad (42)$$

$$\frac{d\Delta z_{10}}{dt} = \Delta I_{M i}^* - \Delta I_{Mdc i} \quad (43)$$

将式(34)、式(35)及式(38)~式(41)联立并线性化, 得到并网接口控制器的线性化模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{Mdc i}^* \\ \Delta I_{M i}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p7} + \frac{k_{i7}}{s} & 0 \\ 0 & k_{p8} + \frac{k_{i8}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{Mdc i}^* \\ \Delta U_{M i}^* \end{bmatrix} - \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} k_{p7} + \frac{k_{i7}}{s} & 0 \\ 0 & k_{p8} + \frac{k_{i8}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{Mdc i} \\ \Delta U_{M i} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{M i}^* \\ \Delta U_{Mdc i}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{p9} + \frac{k_{i9}}{s} & 0 \\ 0 & k_{p10} + \frac{k_{i10}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{Mdc i}^* \\ \Delta I_{M i}^* \end{bmatrix} - \quad (45)$$

$$\begin{bmatrix} k_{p9} + \frac{k_{i9}}{s} & 0 \\ 0 & k_{p10} + \frac{k_{i10}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{M i} \\ \Delta I_{Mdc i} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_{M i} \\ \Delta U_{Mdc i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{3i}}{T_\delta} & 0 \\ 0 & \frac{K_{3i}}{T_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{M i}^* \\ \Delta U_{Mdc i}^* \end{bmatrix} - \quad (46)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{T_\delta} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{M i} \\ \Delta U_{Mdc i} \end{bmatrix}$$

2.4 直流网络线性化模型

与高压直流输电线路多为感性线路不同, 低压配电线路一般为阻性或阻感性线路。本文考虑的直流线路为阻感性形式, 并以 π 型等效, 连接整流接口、逆变接口及各并网接口的辐射状直流网络结构如图 10 所示。

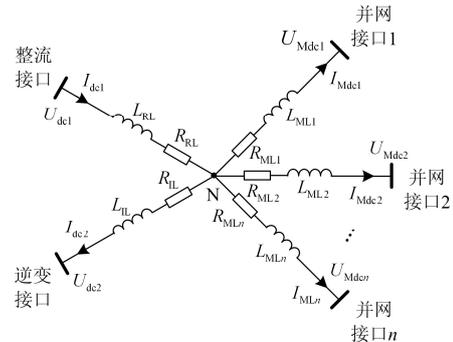


图 10 直流网络等效结构

Fig. 10 Equivalent structure of DC network

图中: N 为直流公共节点; R_{RL} 、 L_{RL} 和 R_{IL} 、 L_{IL} 分别为整流接口和逆变接口到 N 点间直流线路的等效电阻、等效电感; R_{MLi} 、 L_{MLi} 分别为各并网接口

到 N 点间直线路的等效电阻和等效电感。则直流网络暂态数学模型为

$$\begin{cases} L_{RL} \frac{dI_{dc1}}{dt} = U_{dcN} - U_{dc1} - R_{RL} I_{dc1} \\ L_{IL} \frac{dI_{dc2}}{dt} = U_{dc2} - U_{dcN} - R_{IL} I_{dc2} \\ L_{MLi} \frac{dI_{Mdc i}}{dt} = U_{Mdc i} - U_{dcN} - R_{MLi} I_{Mdc i} \\ I_{dc1} = I_{dc2} + \sum_{i=1}^n I_{Mdc i} \end{cases} \quad (47)$$

式中, U_{dcN} 为直流公共节点 N 的设计电压。将式(47)线性化, 得到直流网络线性化模型为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta I_{dc1} \\ \Delta I_{dc2} \\ \Delta I_{Mdc i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{RL}}{L_{RL}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{IL}}{L_{IL}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{MLi}}{L_{MLi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{dc1} \\ \Delta I_{dc2} \\ \Delta I_{Mdc i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{RL}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{IL}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_{MLi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{dc1} \\ \Delta U_{dc2} \\ \Delta U_{Mdc i} \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\Delta I_{dc1} = \Delta I_{dc2} + \sum_{i=1}^n \Delta I_{Mdc i} \quad (49)$$

2.5 系统全局模型

将前文所述整流接口及所连交流主网、逆变接口及所连无源交流系统、并网接口及所连直流微网、直流网络以及各接口控制器的线性化模型联立, 整理得到低压混合系统全局线性化模型为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (50)$$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \mathbf{x}_3 \quad \mathbf{x}_4]^T \quad (51)$$

$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} \Delta X_p & \Delta \theta_p & \Delta i_{Sd} & \Delta i_{Sq} & \Delta u_{Rd} & \Delta u_{Rq} \\ \Delta U_{dc1} & \Delta z_1 & \Delta z_2 & \Delta z_3 & \Delta z_4 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\mathbf{x}_2 = [\Delta i_{Dd} \quad \Delta i_{Dq} \quad \Delta u_{ld} \quad \Delta u_{lq} \quad \Delta U_{dc2} \quad \Delta z_5 \quad \Delta z_6] \quad (53)$$

$$\mathbf{x}_3 = [\Delta \mathbf{x}_{31} \quad \cdots \quad \Delta \mathbf{x}_{3i} \quad \cdots \quad \Delta \mathbf{x}_{3n}] \quad (54)$$

$$\Delta \mathbf{x}_{3i} = [\Delta U_{Mi} \quad \Delta I_{Mdc i} \quad \Delta U_{Mi} \quad \Delta U_{Mdc i} \quad \Delta z_7 \quad \Delta z_8 \quad \Delta z_9 \quad \Delta z_{10}] \quad (55)$$

$$\mathbf{x}_4 = [\Delta I_{dc1} \quad \Delta I_{dc2} \quad \Delta I_{Mdc1} \quad \cdots \quad \Delta I_{Mdc n}] \quad (56)$$

式中: \mathbf{x} 为系统状态变量, 由式(52)—式(56)表示;

\mathbf{x}_1 、 \mathbf{x}_2 和 \mathbf{x}_3 分别为整流接口、逆变接口及并网接口的状态变量, \mathbf{x}_4 为直流网络各支路电流; $\Delta \mathbf{x}_{3i}$ 为第 i 个并网接口的状态变量。

输入变量 \mathbf{u} 由接口电路控制器参考值的变化量构成, 如式(57)—式(59)所示。

$$\mathbf{u} = [\Delta U_{dc1}^* \quad \Delta Q_s^* \quad \Delta u_{Dd}^* \quad \Delta u_{Dq}^* \quad \Delta U_{Mdc i}^* \quad \Delta U_{Mi}^*]^T \quad (57)$$

$$\Delta U_{Mdc i}^* = [\Delta U_{Mdc1}^* \quad \Delta U_{Mdc2}^* \quad \cdots \quad \Delta U_{Mdc n}^*] \quad (58)$$

$$\Delta U_{Mi}^* = [\Delta U_{M1}^* \quad \Delta U_{M2}^* \quad \cdots \quad \Delta U_{Mn}^*] \quad (59)$$

3 仿真验证分析

为验证所提出的线性化模型的正确性, 按图 1 所示结构应用 Matlab 软件分别建立仅含 1 组直流微网的系统电磁暂态模型和线性化模型, 并对二者进行分析对比, 仿真参数见表 1。

为模拟系统扰动, 当 $t=0.1$ s 时设置微电网出力由 40 kW 阶跃至 58 kW, 并在微网内储能装置作用下逐渐恢复稳定运行状态, 上述过程中各换流接口的电压扰动如图 11 所示。其中, 图 11(a)为直流网络中性点电压扰动量 ΔU_{MdcN} ; 图 11(b)、图 11(c)分别为整流接口交流电压 d 轴、 q 轴分量扰动量 ΔU_{Rd} 、 ΔU_{Rq} ; 图 11(d)、图 11(e)分别为逆变接口交流电压 d 轴、 q 轴分量扰动量 ΔU_{ld} 、 ΔU_{lq} ; 图 11(f)为直流微电网出口电压扰动量 ΔU_M 。

表 1 系统仿真参数表

Table 1 System simulation parameters

参数		数值
整流接口侧	交流主网线电压 U_R/V	600
	交流主网内阻 R_1/Ω	0.015
	交流主网电感 L_1/H	0.002
	整流侧等效电阻 R_S/Ω	0.053
逆变接口侧	整流侧等效电感 L_S/H	0.005
	无源交流系统内阻 R_2/Ω	0.024
	无源交流系统电感 L_2/H	0.002
	逆变侧等效电阻 R_D/Ω	0.064
并网接口侧	逆变侧等效电感 L_D/H	0.005
	微电网内阻 R_0/Ω	0.011
直流网络	微电网电感 L_0/H	0.004 2
	直流微网出口电压 U_M/V	400
	直流线路等效电阻 R_{ML}/Ω	0.009
控制器定值	直流线路等效电感 L_{ML}/H	0.002
	直流电压 U_{Mdc}/V	800
	整流接口无功功率 $Q_S/kvar$	40
	逆变接口交流电压 d 轴分量 U_{ld}/V	324
	逆变接口交流电压 q 轴分量 U_{lq}/V	200

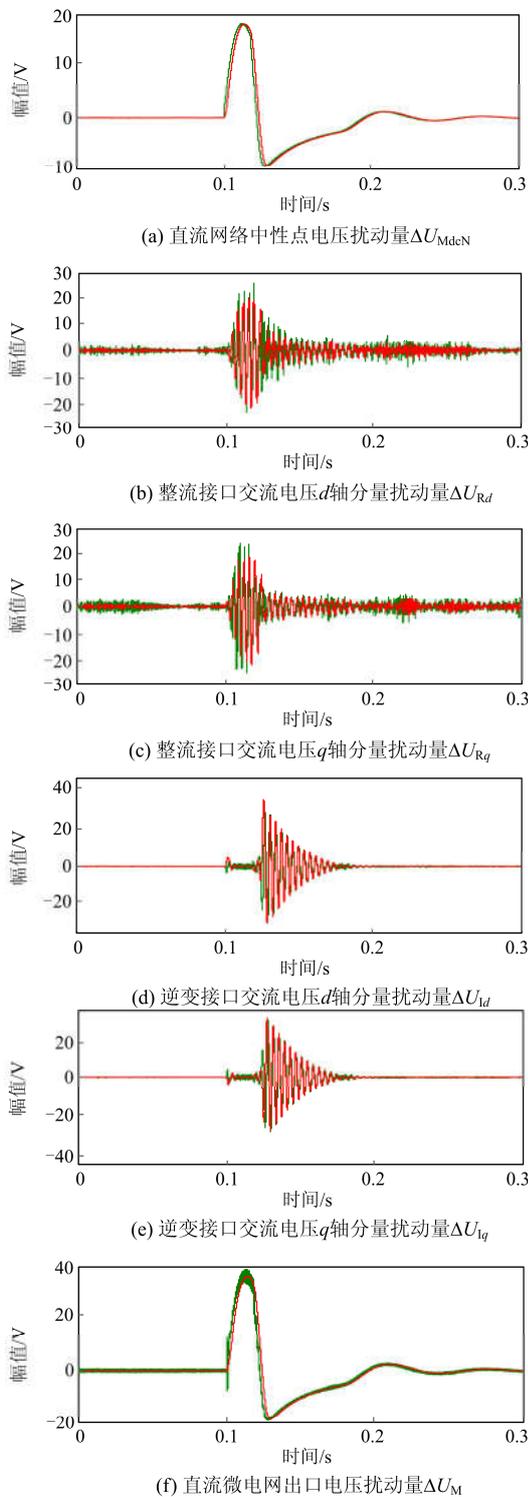


图 11 线性化模型与电磁暂态模型对比结果

Fig. 11 Comparison result of linearized model and electromagnetic transient model

由上述仿真结果可以看出, 本文建立的含多微网交直流混合配电系统线性化模型能够准确地与基于 Matlab/Simulink 的电磁暂态模型相匹配, 并能够

及时、准确地跟踪系统发生小扰动时各参数的变化情况。本文所提出的线性化模型与电磁暂态模型的仿真平均误差率如表 2 所示。

表 2 系统仿真误差率对比

Table 2 Error rate contrast of system simulation

参数	ΔU_{MdcN}	ΔU_{Rd}	ΔU_{Rq}	ΔU_{Id}	ΔU_{Iq}	ΔU_M
误差率/%	0.17	0.61	0.42	0.54	0.59	0.11

4 结论

交直流混合配电网中包含着大量电力电子开关器件, 是一个复杂的高阶非线性系统, 对其进行精确地数学建模和稳定性分析都具有较大难度。本文提出的含多微网的低压交直流混合配电系统全局线性化模型, 通过对同步旋转坐标系的选择与灵活转换, 能够有效消除交流侧短路容量对系统线性化模型准确度的影响; 同时采用一种含控制标识位的控制器建模方法, 并引入锁相环控制环节, 提高了模型在不同系统结构及不同应用场景下的普适性, 对系统暂态情况的参数变化具有更高的实时性与准确性。

参考文献

[1] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.

[2] 王振浩, 成龙. 低压直流配电系统结构分析[J]. 电气自动化, 2016, 38(5): 74-78.
WANG Zhenhao, CHENG Long. An analysis on the structure of the low-voltage DC power distribution system[J]. Electrical Automation, 2016, 38(5): 74-78.

[3] 王振浩, 成龙, 孙福军, 等. 适用于高频连接方式的直流配电系统分层逻辑控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 74-81.
WANG Zhenhao, CHENG Long, SUN Fujun, et al. Hierarchical logic control strategy for high frequency isolated DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 74-81.

[4] ELSAYED A T, MOHAMED A A, MOHAMMED O A. DC microgrids and distribution systems: an overview[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 407-417.

[5] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.

- [6] 张树东, 朱大为, 刘闯, 等. 交直流混合配电型通用功率变换器(UPC)研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 48-55.
ZHANG Shudong, ZHU Dawei, LIU Chuang, et al. Universal power converter (UPC) for hybrid AC and DC distribution[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 48-55.
- [7] PRABHALA V A K, BADDIPADIGA B P, FERDOWSI M. DC distribution systems—an overview[C] // 2014 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), July 21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada: 307-312.
- [8] 鲁国正, 高亮, 梁智敏. 电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(19): 125-130.
LU Guozheng, GAO Liang, LIANG Zhimin. Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(19): 125-130.
- [9] TORRES-OLGUIN R E, MOLINAS M, UNDELAND T M. A controller in d-q synchronous reference frame for hybrid HVDC transmission system[C] // 2010 IEEE International Power Electronics Conference (IPEC), June 21-24, 2010, Sapporo, Japan: 376-383.
- [10] 陆晓楠, 孙凯, JOSEP G, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.
LU Xiaonan, SUN Kai, JOSEP G, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [11] 宋鑫, 肖建国, 牛洁茹, 等. 一种用于新能源混合发电的移相控制三端口 DC-DC 变流器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 36-44.
SONG Xin, XIAO Jianguo, NIU Jieru, et al. A three-port DC-DC converter with phase shift control for the hybrid renewable energy generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 36-44.
- [12] SALOMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [13] BOROYEVICH D, CVETKOVIĆ I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view[C] // 2010 IEEE 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), May 20-22, 2010, Basov, Romania: 1369-1380.
- [14] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, 等. 新能源直流微网的控制架构与层次划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 156-163.
LI Wuhua, GU Yunjie, WANG Yuxiang, et al. Reactive voltage coordinated control for distribution network with DSTATCOMs and DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 156-163.
- [15] 欧阳丽, 周丽红, 向海斌, 等. 无需互联通信的直流微电网实时功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3449-3456.
OUYANG Li, ZHOU Lihong, XIANG Haibin, et al. Real-time power coordinated control strategy for DC microgrid without communication[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3449-3456.
- [16] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Mingyu, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [17] 杨洁, 刘开培, 余俞, 等. 交流电网互联的双端柔性直流输电系统小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2177-2184.
YANG Jie, LIU Kaipei, YU Yu, et al. Small signal modeling for VSC-HVDC used in AC grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2177-2184.
- [18] 杨洁, 刘开培, 饶雪, 等. 多端柔性直流输电系统小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4015-4024.
YANG Jie, LIU Kaipei, RAO Xue, et al. Small signal modeling for VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4015-4024.
- [19] KALCON G O, ADAM G P. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.
- [20] 郑超, 周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 7-12.
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Small signal dynamic modeling and damping controller designing for VSC based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 7-12.

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2018-07-13

作者简介:

成 龙(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 助理实验师, 研究方向为交直流配电系统节能及运行控制、电能质量综合治理; E-mail: chenglong_1231@126.com

瞿士才(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为厂站机电设备安全运行与管理; E-mail: 83565127@qq.com

唐 凯(1971—), 男, 工程师, 研究方向为变电设备运行与管理。E-mail: 49706876@qq.com

(编辑 魏小丽)