

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.01.016

交直流配电网小信号模型和直流侧低频振荡分析

陈庆¹, 范栋琛², 王晨清², 刘文凯³, 袁晓冬², 袁小明³

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

3. 强磁场工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要:交直流配电网发展迅猛、应用广泛,其稳定性是行业关注的焦点。文中针对某交直流配电网工程调试阶段出现的直流侧低频振荡现象,开展稳定性分析。文中首先在小信号建模基础上,采用特征值分析方法,分析电网强度、功率水平、控制参数 3 种因素对低频振荡的影响。随后,文中提出改变控制器参数和增加附加控制器的振荡抑制措施。理论和仿真分析表明:弱电网会影响电压源型变换器(VSC)的稳定性;375 V 直流侧功率增大至超过额定功率时会发生低频振荡;Buck 变换器电流内环比例积分(PI)控制器积分系数不影响系统的稳定性,但影响振荡发生后的振荡频率,电压外环 PI 控制器比例系数过小或积分系数过大会造成系统不稳定;改变 Buck 变换器电压外环 PI 控制器参数和增加附加控制器可有效抑制低频振荡。文中针对实际交直流配电网振荡影响因素的理论及仿真分析,对其他交直流配电网工程调试及运行分析具有借鉴意义。

关键词:交直流配电网;小信号模型;特征值分析;低频振荡;附加控制器;振荡抑制

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)01-0117-09

0 引言

交直流配电网具有输送功率灵活可控、紧急状态下可提供快速跨区功率支撑等诸多优势,工程应用极为广泛^[1-2]。然而,随着电力电子设备的大量接入,系统动态稳定性问题日益突出。在某实际交直流配电网调试过程中,出现了直流侧低频振荡现象。文中针对该问题对交直流配电网的稳定性进行分析,以期为后续交直流配电网工程的调试及运行提供参考。

小信号稳定性分析是研究动态稳定性的常用方法之一,可利用状态空间、特征值分析等方法研究系统遭受小扰动后保持稳定运行的相关问题。特征值分析法在小扰动稳定性分析方面得到广泛应用,文献[3-5]均利用特征值分析法分析不同控制参数对系统稳定性的影响。针对含电力电子设备的系统振荡问题,文献[6-7]指出大量负载通过 DC/DC 或 AC/DC 变换器接入电力系统,导致系统阻尼不足,从而引发直流电压自激振荡。文献[8]指出恒功率负载可能导致微电网主母线电压出现明显振荡或崩溃。文献[9]将变流器控制与机网振荡的多种模态联系起来,研究控制参数对振荡模态的影响。文献[10]指出由于 LC 滤波器输出阻抗和 LC 滤波器输入负阻抗在工作点附近的相互作用,输

入电压可能出现振荡。文献[11]通过在控制环节增加虚拟电阻,抑制交直流变换器输出 LC 滤波器的振荡。综上所述,系统的振荡问题在实际运行中时有发生,不同因素影响系统振荡的规律也不尽相同。不同的硬件结构、不同的控制参数和不同的控制策略都会影响振荡的变化规律。然而,目前关于交直流配电网低频振荡的研究较少,其发生原因及影响规律亦较少涉及。因此,文中从实际交直流配电网直流侧出现的 4 Hz 左右低频振荡现象出发,在小信号建模基础上,对交直流配电网的稳定性进行分析。

为了深入研究影响该低频振荡的主要因素,并提出合理的抑制措施,文中从电网强度、功率水平、控制参数 3 个方面,讨论其对系统稳定性的影响,并从改变控制器参数和附加控制器 2 个角度,研究低频振荡抑制措施。文中研究内容对交直流配电网稳定性分析具有重要的参考价值。

1 交直流配电网及其小信号模型

1.1 交直流配电网模型

文中涉及的交直流配电网简化模型如图 1 所示。该模型共有 4 个端口,分别为交流端口 AC 10 kV、AC 380 V 以及直流端口 DC 750 V、DC 375 V。10 kV 交流母线经过电力电子变压器(power electronic transformer, PET)主阀塔得到 750 V 直流电压, PET 主阀塔采用级联 H 桥(cascaded H-bridge,

收稿日期:2021-08-17;修回日期:2021-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1866601)

CHB)+隔离型双向有源桥(dual active bridge, DAB)结构,该结构由5个相同的CHB和DAB构成,如图2所示。DC 750 V有2个出口,一个接电压源型变换器(voltage source converter, VSC) VSC1后回到10 kV交流母线;另一个接三相 Buck 变换器至 DC 375 V,再接 VSC2 至 AC 380 V 交流母线。当三相 Buck 变换器的功率不断增大至超过额定功率时,375 V 直流侧将发生 4 Hz 低频振荡现象。

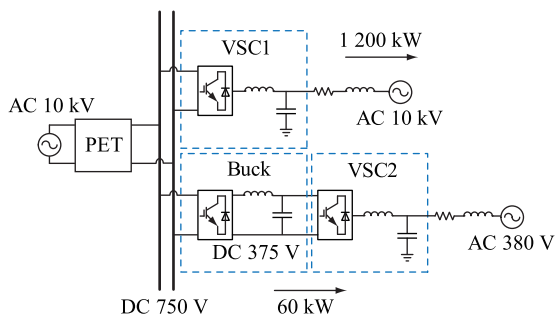


图1 交直流配电网简化模型

Fig.1 The simplified model of AC/DC distribution network

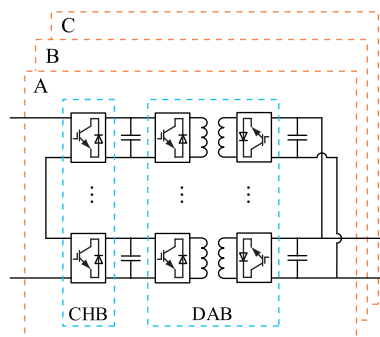


图2 PET 主阀塔结构

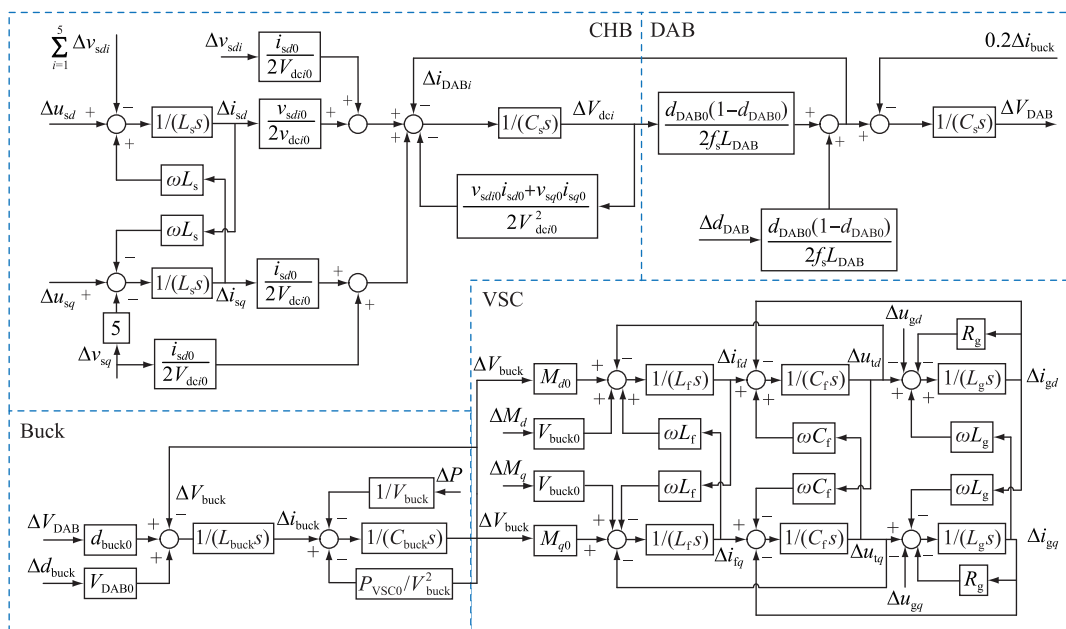
Fig.2 The structure of the PET main valve tower

1.2 交直流配电网小信号模型

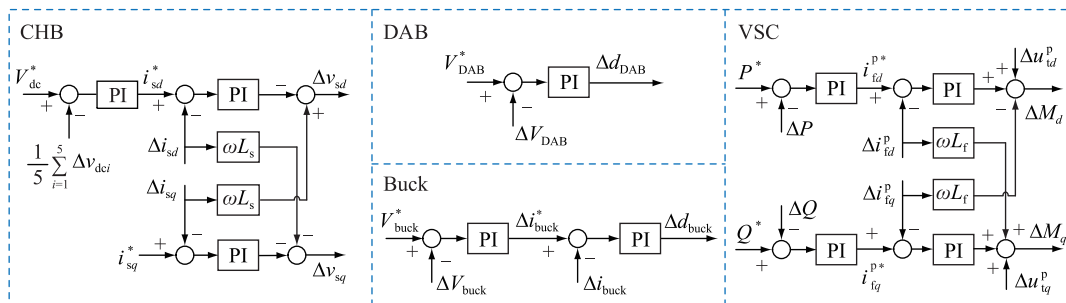
建立交直流配电网的小信号模型,如图3所示。将某一非线性系统在工作点处进行线性化,形式如式(1)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y = C \Delta x + D \Delta u \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为系统的状态向量; y 为输出向量; u 为系统的输入向量; A 为状态矩阵; B 为输入矩阵; C 为输



(a) 各模块小信号模型



(b) 各模块控制器小信号模型

图3 交直流配电网小信号模型

Fig.3 The small signal model of AC/DC distribution network

出矩阵; \mathbf{D} 为前馈矩阵。

特征值分析法需要求解出状态矩阵 \mathbf{A} 的特征值,再根据特征值判断系统的稳定性。文中将根据特征值分析方法,给出交直流配电网中各个模块的特征方程。

1.2.1 CHB 小信号模型

CHB 电气部分的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_{sd} = \frac{1}{L_s} \Delta u_{sd} - \frac{5}{L_s} \Delta v_{sd} + \omega \Delta i_{sq} \\ \Delta \dot{i}_{sq} = \frac{1}{L_s} \Delta u_{sq} - \frac{5}{L_s} \Delta v_{sq} - \omega \Delta i_{sd} \\ \Delta \dot{V}_{dci} = \frac{i_{sd0}}{2C_1 V_{dci0}} \Delta v_{sd} + \frac{v_{sd0}}{2C_1 V_{dci0}} \Delta i_{sd} + \frac{i_{sq0}}{2C_1 V_{dci0}} \Delta v_{sq} + \\ \frac{v_{sq0}}{2C_1 V_{dci0}} \Delta i_{sq} - \frac{v_{sd0} i_{sd0} + v_{sq0} i_{sq0}}{2C_1 V_{dci0}^2} \Delta V_{dci} - \frac{\Delta i_{DABi}}{C_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为工频角频率; L_s 为 CHB 输入侧接入的电感; C_1 为 CHB 输出侧的并联电容; u_{sd}, u_{sq} 分别为输入交流电源 d, q 轴直流电压; v_{sd}, v_{sq} 分别为 CHB 输入端口 d, q 轴直流电压; v_{sd0}, v_{sq0} 分别为 v_{sd}, v_{sq} 的稳态工作点; i_{sd}, i_{sq} 分别为图 2 中 CHB 输入端口 d, q 轴直流电流; i_{sd0}, i_{sq0} 分别为 i_{sd}, i_{sq} 的稳态工作点; V_{dci} 为 CHB 中第 $i(i=1, 2, \dots, 5)$ 级 H 桥的输出端口直流电压; V_{dci0} 为 V_{dci} 的稳态工作点; i_{DABi} 为 CHB 中第 i 级 H 桥对后一级 DAB 的输入电流。

CHB 控制器的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_1^{\text{CHB}} = -\frac{1}{5} k_{i1}^{\text{CHB}} \sum_{i=1}^5 \Delta V_{dci} \\ \Delta v_{sd}^* = \Delta x_1^{\text{CHB}} - \frac{1}{5} k_{p1}^{\text{CHB}} \sum_{i=1}^5 \Delta V_{dci} \\ \Delta \dot{x}_{2d}^{\text{CHB}} = -k_{i2}^{\text{CHB}} \Delta i_{sd} \\ \Delta v_{sd} = \omega L_s \Delta i_{sq} - \Delta x_{2d}^{\text{CHB}} + k_{p2}^{\text{CHB}} \Delta i_{sd} \\ \Delta \dot{x}_{2q}^{\text{CHB}} = -k_{i2}^{\text{CHB}} \Delta i_{sq} \\ \Delta v_{sq} = -\omega L_s \Delta i_{sd} - \Delta x_{2q}^{\text{CHB}} + k_{p2}^{\text{CHB}} \Delta i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_1^{\text{CHB}}, x_{2d}^{\text{CHB}}, x_{2q}^{\text{CHB}}$ 分别为 CHB 控制器电压外环比例积分 (proportional integrator, PI)、电流内环 d 轴 PI、电流内环 q 轴 PI 的积分器输出变量; $k_{p1}^{\text{CHB}}, k_{i1}^{\text{CHB}}$ 分别为电压外环 PI 控制器的比例系数和积分系数; $k_{p2}^{\text{CHB}}, k_{i2}^{\text{CHB}}$ 分别为电流内环 PI 控制器的比例系数和积分系数; Δv_{sd}^* 为 Δi_{sd} 的参考值。

CHB 均压控制的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_4^{\text{CHB}} = -k_{i3}^{\text{CHB}} \Delta V_{dci} \\ \Delta v_{sdi} = \Delta v_{sd} + \Delta x_4^{\text{CHB}} - k_{p3}^{\text{CHB}} \Delta V_{dci} \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_{sdi} 为均压控制后第 i 级 H 桥输入端口 d 轴直

流电压; x_4^{CHB} 为 CHB 均压控制器 PI 的积分器输出变量; $k_{p3}^{\text{CHB}}, k_{i3}^{\text{CHB}}$ 分别为 CHB 均压控制器 PI 的比例系数和积分系数。

在 CHB 的小信号模型中,对应式(1)的状态变量 $\Delta \mathbf{x}_{\text{CHB}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{CHB}} = [\Delta i_{sd} \Delta i_{sq} \Delta V_{dci} \Delta x_1^{\text{CHB}} \Delta x_{2d}^{\text{CHB}} \Delta x_{2q}^{\text{CHB}} \Delta x_4^{\text{CHB}}]^T \quad (5)$$

输入变量 $\Delta \mathbf{u}_{\text{CHB}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{u}_{\text{CHB}} = [\Delta u_{sd} \Delta u_{sq} \Delta i_{DABi}]^T \quad (6)$$

输出变量 $\Delta \mathbf{y}_{\text{CHB}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{y}_{\text{CHB}} = [\Delta i_{sd}^* \Delta v_{sdi} \Delta v_{sq} \Delta v_{sd}]^T \quad (7)$$

结合式(2)一式(7),得到 CHB 小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{CHB}} = \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{x}_{\text{CHB}} + \mathbf{B}_1 \Delta \mathbf{u}_{\text{CHB}} \\ \Delta \mathbf{y}_{\text{CHB}} = \mathbf{C}_1 \Delta \mathbf{x}_{\text{CHB}} + \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{u}_{\text{CHB}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1, \mathbf{C}_1, \mathbf{D}_1$ 分别对应 CHB 小信号模型的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵、前馈矩阵。

1.2.2 DAB 小信号模型

DAB 电气部分的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta i_{DABi} = \frac{d_{DAB0}(1-d_{DAB0})}{2f_s L_{DAB}} \Delta V_{dci} + \\ \frac{V_{dci0}(1-2d_{DAB0})}{2f_s L_{DAB}} \Delta d_{DAB} \\ \Delta V_{DABi} = \frac{\Delta i_{DABi}}{C_2} - \frac{0.2 \Delta i_{\text{buck}}}{C_2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: L_{DAB} 为 DAB 中变压器原边的串联电感; C_2 为 DAB 输出侧的并联电容; V_{DABi} 为 DAB 中第 $i(i=1, 2, \dots, 5)$ 级的输出电压; d_{DAB} 为 DAB 控制器得到的占空比; d_{DAB0} 为 d_{DAB} 的稳态工作点; i_{buck} 为 DAB 输入到后一级 Buck 变换器的电流; f_s 为 DAB 的开关频率。

DAB 控制部分的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = -\frac{1}{5} k_i \sum_{i=1}^5 V_{DABi} \\ \Delta d_{DAB} = \frac{1}{2\pi} \left(\Delta x - \frac{1}{5} k_p \sum_{i=1}^5 V_{DABi} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中: x 为 DAB 控制器 PI 的积分器输出变量; k_p, k_i 分别为 DAB 控制器 PI 的比例系数和积分系数。

在 DAB 小信号模型中,对应式(1)的状态变量 $\Delta \mathbf{x}_{\text{DAB}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{DAB}} = [\Delta V_{DABi} \Delta x]^T \quad (11)$$

输入变量 $\Delta \mathbf{u}_{\text{DAB}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{u}_{\text{DAB}} = [\Delta V_{dci} \Delta i_{\text{buck}}]^T \quad (12)$$

输出变量 $\Delta \mathbf{y}_{\text{DAB}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{y}_{\text{DAB}} = [\Delta i_{DABi} \Delta d_{DAB}]^T \quad (13)$$

结合式(9)一式(13),得到DAB小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{DAB}} = \mathbf{A}_2 \Delta \mathbf{x}_{\text{DAB}} + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{u}_{\text{DAB}} \\ \Delta \mathbf{y}_{\text{DAB}} = \mathbf{C}_2 \Delta \mathbf{x}_{\text{DAB}} + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{u}_{\text{DAB}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{A}_2, \mathbf{B}_2, \mathbf{C}_2, \mathbf{D}_2$ 分别为DAB小信号模型的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵、前馈矩阵。

1.2.3 三相 Buck 变换器小信号模型

三相 Buck 变换器电气部分的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_{\text{buck}} = \frac{V_{\text{DAB0}}}{L_{\text{buck}}} \Delta d_{\text{buck}} + \frac{d_{\text{buck0}}}{L_{\text{buck}}} \Delta V_{\text{DAB}} - \frac{\Delta V_{\text{buck}}}{L_{\text{buck}}} \\ \Delta V_{\text{buck}} = \frac{\Delta i_{\text{buck}}}{C_{\text{buck}}} + \frac{P_{\text{VSC0}}}{C_{\text{buck}} V_{\text{buck0}}^2} \Delta V_{\text{buck}} - \frac{\Delta P_{\text{VSC}}}{C_{\text{buck}} V_{\text{buck0}}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $L_{\text{buck}}, C_{\text{buck}}$ 分别为 Buck 变换器的滤波电感和电容; V_{DAB} 为 DAB 到 Buck 变换器的输入电压,此处假定 DAB 各级输出电压相同; i_{buck} 为流过 Buck 变换器的电流; V_{buck} 为 Buck 变换器的输出直流电压; V_{buck0} 为 V_{buck} 的稳态工作点; d_{buck} 为 Buck 控制器得到的占空比; d_{buck0} 为 d_{buck} 的稳态工作点; P_{VSC} 为 Buck 变换器输入到下一级 VSC 的输入功率; P_{VSC0} 为 P_{VSC} 的稳态工作点。

三相 Buck 变换器控制部分的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_1^{\text{buck}} = -k_{i1}^{\text{buck}} \Delta V_{\text{buck}} \\ \Delta i_{\text{buck}}^* = \Delta x_1^{\text{buck}} - k_{p1}^{\text{buck}} \Delta V_{\text{buck}} \\ \Delta \dot{x}_2^{\text{buck}} = -k_{i2}^{\text{buck}} \Delta i_{\text{buck}} \\ \Delta d_{\text{buck}} = \Delta x_2^{\text{buck}} - k_{p2}^{\text{buck}} \Delta i_{\text{buck}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $x_1^{\text{buck}}, x_2^{\text{buck}}$ 分别为 Buck 控制器电压外环 PI、电流内环 PI 的积分器输出变量; $k_{p1}^{\text{buck}}, k_{i1}^{\text{buck}}$ 分别为电压外环 PI 控制器的比例系数和积分系数; $k_{p2}^{\text{buck}}, k_{i2}^{\text{buck}}$ 分别为电流内环 PI 控制器的比例系数和积分系数; Δi_{buck}^* 为 Δi_{buck} 的参考值。

在三相 Buck 变换器的小信号模型中,对应式(1)的状态变量 $\Delta \mathbf{x}_{\text{buck}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{buck}} = [\Delta i_{\text{buck}} \Delta V_{\text{buck}} \Delta x_1^{\text{buck}} \Delta x_2^{\text{buck}}]^T \quad (17)$$

输入变量 $\Delta \mathbf{u}_{\text{buck}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{u}_{\text{buck}} = [\Delta V_{\text{DAB}} \Delta P_{\text{VSC}}]^T \quad (18)$$

输出变量 $\Delta \mathbf{y}_{\text{buck}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{y}_{\text{buck}} = [\Delta i_{\text{buck}}^* \Delta d_{\text{buck}}]^T \quad (19)$$

结合式(15)一式(19),得到三相 Buck 变换器小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{buck}} = \mathbf{A}_3 \Delta \mathbf{x}_{\text{buck}} + \mathbf{B}_3 \Delta \mathbf{u}_{\text{buck}} \\ \Delta \mathbf{y}_{\text{buck}} = \mathbf{C}_3 \Delta \mathbf{x}_{\text{buck}} + \mathbf{D}_3 \Delta \mathbf{u}_{\text{buck}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\mathbf{A}_3, \mathbf{B}_3, \mathbf{C}_3, \mathbf{D}_3$ 分别为三相 Buck 变换器小信号模型的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵、前馈矩阵。

1.2.4 VSC 小信号模型

VSC 电气部分的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_{fd} = \frac{M_{d0}}{L_f} \Delta V_{\text{buck}} + \frac{V_{\text{buck0}}}{L_f} \Delta M_d - \frac{1}{L_f} \Delta u_{fd} + \omega \Delta i_{fq} \\ \Delta \dot{i}_{fq} = \frac{M_{q0}}{L_f} \Delta V_{\text{buck}} + \frac{V_{\text{buck0}}}{L_f} \Delta M_q - \frac{1}{L_f} \Delta u_{fq} - \omega \Delta i_{fd} \\ \Delta \dot{u}_{fd} = \frac{1}{C_f} \Delta i_{fd} - \frac{1}{C_f} \Delta i_{gd} + \omega \Delta u_{fq} \\ \Delta \dot{u}_{fq} = \frac{1}{C_f} \Delta i_{fq} - \frac{1}{C_f} \Delta i_{gq} - \omega \Delta u_{fd} \\ \Delta \dot{i}_{gd} = \frac{1}{L_g} \Delta u_{fd} - \frac{1}{L_g} \Delta u_{gd} - \frac{R_g}{L_g} i_{gd} + \omega \Delta i_{gq} \\ \Delta \dot{i}_{gq} = \frac{1}{L_g} \Delta u_{fq} - \frac{1}{L_g} \Delta u_{gq} - \frac{R_g}{L_g} i_{gq} - \omega \Delta i_{gd} \end{cases} \quad (21)$$

式中: L_f, C_f 分别为 VSC 的滤波电感和电容; R_g, L_g 分别为无穷大电源的内电阻和内电感; M_d, M_q 分别为调制占空比的 d, q 轴分量; M_{d0}, M_{q0} 分别为 M_d, M_q 的稳态工作点; i_{fd}, i_{fq} 分别为流过滤波电感的 d, q 轴直流电流; u_{fd}, u_{fq} 分别为 VSC 输出端电压的 d, q 轴分量; i_{gd}, i_{gq} 分别为并网后流入无穷大电网的电流 d, q 轴分量; u_{gd}, u_{gq} 分别为并网后无穷大电网的电压 d, q 轴分量。

VSC 控制部分的线性化方程为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_{1d}^{\text{VSC}} = -k_{i1}^{\text{VSC}} \Delta P \\ \Delta i_{fd}^* = \Delta x_{1d}^{\text{VSC}} - k_{p1}^{\text{VSC}} \Delta P \\ \Delta \dot{x}_{1q}^{\text{VSC}} = -k_{i1}^{\text{VSC}} \Delta Q \\ \Delta i_{fq}^* = \Delta x_{1q}^{\text{VSC}} - k_{p1}^{\text{VSC}} \Delta Q \\ \Delta \dot{x}_{2d}^{\text{VSC}} = -k_{i2}^{\text{VSC}} \Delta i_{fd} \\ \Delta M_d = \Delta u_{fd}^p - \omega L_f \Delta i_{fq}^p - \Delta x_{2d}^{\text{VSC}} + k_{p2}^{\text{VSC}} \Delta i_{fd} \\ \Delta \dot{x}_{2q}^{\text{VSC}} = -k_{i2}^{\text{VSC}} \Delta i_{sq} \\ \Delta M_q = \Delta u_{fq}^p + \omega L_f \Delta i_{fd}^p + \Delta x_{2q}^{\text{VSC}} - k_{p2}^{\text{VSC}} \Delta i_{fq} \end{cases} \quad (22)$$

式中: u_{fd}^p, u_{fq}^p 分别为控制器坐标系下 VSC 输出端电压的 d, q 轴分量; i_{fd}^p, i_{fq}^p 分别为控制器坐标系下流过滤波电感的 d, q 轴直流电流; $\Delta i_{fd}^*, \Delta i_{fq}^*$ 分别为 i_{fd}, i_{fq} 的参考值; $x_{1d}^{\text{VSC}}, x_{1q}^{\text{VSC}}, x_{2d}^{\text{VSC}}, x_{2q}^{\text{VSC}}$ 分别为 VSC 控制器电压外环 d 轴 PI、电压外环 q 轴 PI、电流内环 d 轴 PI、电流内环 q 轴 PI 的积分器输出变量; $k_{p1}^{\text{VSC}}, k_{i1}^{\text{VSC}}$ 分别为功率环 PI 控制器的比例系数和积分系数; $k_{p2}^{\text{VSC}}, k_{i2}^{\text{VSC}}$ 分别为电流内环 PI 控制器的比例系数和积分系数; P, Q 分别为 VSC 输入有功、无功功率。

在 VSC 的小信号模型中,对应式(1)的状态变量 $\Delta \mathbf{x}_{\text{VSC}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{VSC}} = [\Delta i_{\text{td}} \Delta i_{\text{tq}} \Delta u_{\text{td}} \Delta u_{\text{tq}} \Delta i_{\text{gd}} \Delta i_{\text{gq}} \Delta x_{1d}^{\text{VSC}} \Delta x_{1q}^{\text{VSC}} \Delta x_{2d}^{\text{VSC}} \Delta x_{2q}^{\text{VSC}}]^T \quad (23)$$

输入变量 $\Delta \mathbf{u}_{\text{VSC}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{u}_{\text{VSC}} = [\Delta V_{\text{buck}} \Delta P \Delta Q]^T \quad (24)$$

输出变量 $\Delta \mathbf{y}_{\text{VSC}}$ 为:

$$\Delta \mathbf{y}_{\text{VSC}} = [\Delta M_d \Delta M_q \Delta i_{\text{td}}^{\text{p}*} \Delta i_{\text{tq}}^{\text{p}*}]^T \quad (25)$$

式中: $\Delta i_{\text{td}}^{\text{p}*}$, $\Delta i_{\text{tq}}^{\text{p}*}$ 分别为 i_{td}^{p} , i_{tq}^{p} 的参考值。

结合式(21)一式(25),得到VSC小信号模型为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}}_{\text{VSC}} = \mathbf{A}_4 \Delta \mathbf{x}_{\text{VSC}} + \mathbf{B}_4 \Delta \mathbf{u}_{\text{VSC}} \\ \Delta \mathbf{y}_{\text{VSC}} = \mathbf{C}_4 \Delta \mathbf{x}_{\text{VSC}} + \mathbf{D}_4 \Delta \mathbf{u}_{\text{VSC}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: \mathbf{A}_4 , \mathbf{B}_4 , \mathbf{C}_4 , \mathbf{D}_4 分别为VSC小信号模型的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵、前馈矩阵。

2 系统低频振荡影响因素分析

基于上述分析,研究375 V直流侧出现低频振荡的原因,利用特征值分析法分别从电网强度、功率水平、控制参数3个方面,分析不同条件下375 V直流侧低频振荡时特征值的变化情况,得出不同因素对振荡的影响规律。仿真参数如表1所示。

表1 仿真模型主要参数

参数	数值	参数	数值
L_s/mH	10	R_g/Ω	0.1
$C_1/\mu\text{F}$	10 000	$k_{\text{p}1}^{\text{VSC}}, k_{\text{i}1}^{\text{VSC}}$	10, 100
$k_{\text{p}1}^{\text{CHB}}, k_{\text{i}1}^{\text{CHB}}$	10, 100	$k_{\text{p}2}^{\text{VSC}}, k_{\text{i}2}^{\text{VSC}}$	1, 200
$k_{\text{p}2}^{\text{CHB}}, k_{\text{i}2}^{\text{CHB}}$	150, 200	$L_{\text{buck}}/\text{mH}$	500
L_{DAB}/mH	0.046	$k_{\text{p}1}^{\text{buck}}, k_{\text{i}1}^{\text{buck}}$	5, 30
$C_2/\mu\text{F}$	100 000	$k_{\text{p}2}^{\text{buck}}, k_{\text{i}2}^{\text{buck}}$	0.15, 320
k_p, k_i	0.02, 0.8	L_f/mH	10
L_g/mH	0.03	$C_{\text{buck}}/\mu\text{F}$	0.1
$C_f/\mu\text{F}$	1 000		

2.1 电网强度

电网强度又称短路比(short circuit ratio, SCR),其定义为^[12-14]:

$$f_{\text{SCR}} = \frac{S_{\text{ac}}}{P_{\text{dN}}} = \frac{U_{\text{N}}^2}{P_{\text{dN}} Z} \quad (27)$$

式中: S_{ac} 为交流短路容量; P_{dN} 为额定直流输送功率; U_{N} 为直流馈入点的交流额定电压; Z 为交流系统等效电抗(忽略线路电阻)。

电网强度用于区分交流系统的强弱,是影响含电力电子设备的交直流配电网稳定性的一个重要因素,电网强度越强则系统越稳定。380 V交流侧 f_{SCR} 的变化,影响375 V直流侧电压和VSC端电压的主要特征值,如图4所示。由图4可知,随着 f_{SCR}

逐渐变小,VSC端电压主要特征值的阻尼系数逐渐变小、振荡系数逐渐变大。当 f_{SCR} 由3变到1时,特征值从左半平面穿越至右半平面,系统失稳,表现为幅值增大的振荡。而375 V直流侧电压的主要特征值在 f_{SCR} 不断变化时并无较大变化,即380 V交流侧 f_{SCR} 对375 V直流侧电压影响不大。因此,380 V交流侧在弱电网强度下,只会使VSC端电压发生振荡,375 V直流侧电压仍可以保持稳定。

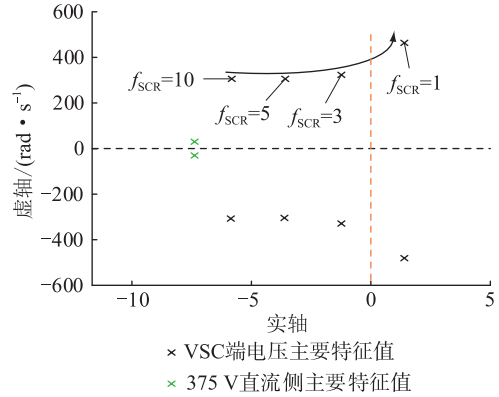


图4 不同 f_{SCR} 下主要特征值的变化趋势

Fig.4 The variation trend of the main eigenvalues under different f_{SCR}

若0~3 s时, f_{SCR} 为3,3 s后 f_{SCR} 变为1,VSC端电压 d 轴分量的波形如图5所示。由图5可知,当380 V交流侧 f_{SCR} 为3时,电压波形不变。380 V交流侧 f_{SCR} 变为1后,即3 s后电压波形发生振荡,这与图4中主要特征值从左半平面穿越到右半平面的结果一致,验证了上述分析的正确性。

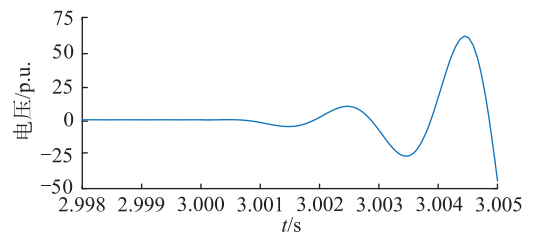


图5 不同 f_{SCR} 下VSC端电压 d 轴分量波形

Fig.5 The d -axis component waveform of VSC terminal voltages under different f_{SCR}

2.2 功率水平

在实际交直流配电网运行过程中,375 V直流侧功率增大时会发生低频振荡,因此375 V直流侧功率是影响低频振荡的重要原因。不同功率水平下,系统主要特征值随功率的变化情况如图6所示。

由图6可知,特征值的振荡频率和阻尼系数都会随着功率的增大而减小,当功率大于54.1 kW时,特征值从左半平面穿越至右半平面,系统失稳,表现为幅值增大的振荡。因此,为确保系统的稳定运

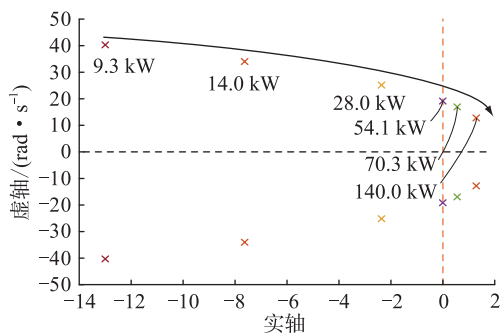


图6 功率水平变化时主要特征值的变化趋势

Fig.6 The variation trend of the main eigenvalues with the change of power levels

行,应尽量保证运行功率在额定功率以下。

功率水平是影响系统稳定性的一个重要因素,当375 V直流侧的运行功率超过额定功率时,系统失稳,呈现不同程度的振荡。0~5 s时,系统处于稳定状态,0.5 s时将375 V直流侧的功率从原先的9.3 kW分别提升至14.0 kW,54.1 kW,70.3 kW,观察3种功率水平下直流电压的波形变化,如图7所示。结合图6中特征值随功率水平的变化可知,功率从9.3 kW增加至14.0 kW时,系统的主要特征值仍在左半平面,系统仍保持稳定,即图7中0.5 s后,电压经过一段动态过程后仍恢复稳定。当功率从9.3 kW增加至54.1 kW时,系统的主要特征值位于虚轴,系统发生等幅振荡,即图7中0.5 s后,电压波形发生等幅振荡,频率约为4 Hz。功率从9.3 kW增加至70.3 kW时,系统特征值位于右半平面,系统失稳,即图7中0.5 s后,电压波形发生幅值不断增大的振荡。

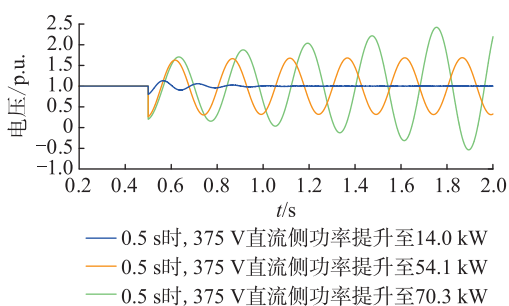


图7 不同功率水平下375 V直流侧电压波形

Fig.7 Waveforms of the 375 V DC side voltage under different power levels

2.3 控制参数

在功率水平等其他条件均不变的情况下,分析不同控制参数对系统低频振荡的影响。由于振荡发生时主要集中在375 V直流侧,380 V交流侧及其他母线电压均正常,故选取Buck变换器的3个控制参数,即电流内环PI控制器积分系数 k_{i1}^{buck} 、电压外环PI控制器比例系数 k_{p1}^{buck} 、电压外环PI控制器

积分系数 k_{i1}^{buck} 进行分析。

2.3.1 Buck变换器电流内环PI控制器积分系数

当 k_{i2}^{buck} 变化时,系统主要特征值的变化情况如图8所示。由图8可知,主要特征值的阻尼系数和振荡频率都随着 k_{i2}^{buck} 减小而减小。而 k_{i2}^{buck} 不断减小到0时特征值不会出现穿越虚轴到右半平面的情况,即 k_{i2}^{buck} 的大小对系统的稳定性影响较小,主要影响系统发生振荡时的振荡频率及振荡幅值。

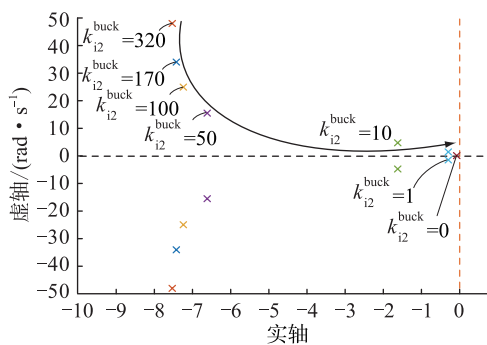


图8 k_{i2}^{buck} 变化时主要特征值的变化趋势

Fig.8 The variation trend of the main eigenvalues with the change of k_{i2}^{buck}

375 V直流侧电压波形随 k_{i2}^{buck} 的变化情况如图9所示。当 k_{i2}^{buck} 为320,170,50时,分别对应4 Hz,3 Hz,1.6 Hz的电压振荡。即 k_{i2}^{buck} 越小,振荡频率越小,与图8中的分析结果一致。

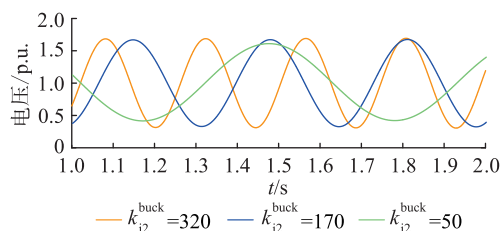


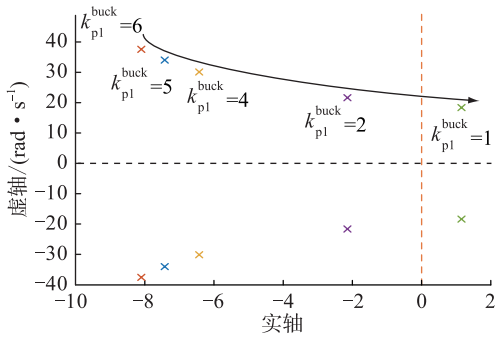
图9 k_{i2}^{buck} 对375 V直流侧电压波形的影响

Fig.9 The influence of k_{i2}^{buck} on the 375 V DC side voltage waveform

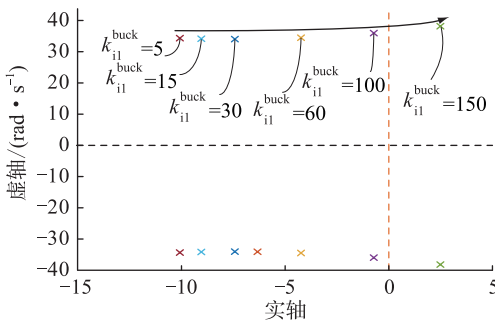
2.3.2 Buck变换器电压外环PI控制器比例及积分系数

k_{p1}^{buck} 变化时,系统的主要特征值变化情况如图10所示。由图10可知,主要特征值的阻尼系数和振荡频率都随着 k_{p1}^{buck} 的减小而减小,而 k_{p1}^{buck} 不断减小时会出现特征值从左半平面穿越至右半平面的情况(临界值在1~2之间),导致系统失稳,表现为幅值增大的振荡。因此在系统发生振荡时,在保证 k_{p1}^{buck} 不小于2的情况下,可适当调整 k_{p1}^{buck} 使系统重新回归稳定。

k_{i1}^{buck} 变化时,系统主要特征值的变化情况如图11所示。由图11可知,主要特征值的阻尼系数和

图 10 k_{pi}^{buck} 变化时主要特征值的变化趋势Fig.10 The variation trend of the main eigenvalues with the change of k_{pi}^{buck}

振荡频率都随着 k_{ii}^{buck} 的增大而增大,而 k_{ii}^{buck} 持续增大时会出现特征值从左半平面穿越至右半平面的情况(临界值在 100~150 之间),导致系统失稳,表现为幅值增大的振荡。因此在系统发生振荡时,在保证 k_{ii}^{buck} 不大于 100 的情况下,可适当调整 k_{ii}^{buck} 使系统重新回归稳定。

图 11 k_{ii}^{buck} 变化时主要特征值的变化趋势Fig.11 The variation trend of the main eigenvalues with the change of k_{ii}^{buck}

电压外环 PI 控制器比例及积分系数变化时, 375 V 直流侧电压波形的变化情况如图 12 所示。

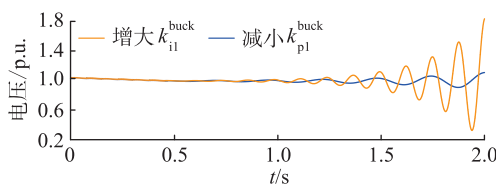


图 12 电压外环 PI 控制器参数对 375 V 直流侧电压波形的影响

Fig.12 The influence of voltage outer loop PI controller parameters on 375 V DC side voltage waveform

0~0.5 s 时,系统稳定,在 0.5 s 时将 k_{pi}^{buck} 由 5 变到 1,系统失稳,表现为幅值增大的振荡,即图 10 中主要特征值从左半平面穿越至右半平面。同样地,在 0.5 s 时将 k_{ii}^{buck} 由 30 变到 150,系统失稳,表现为幅值增大的振荡,即图 11 中主要特征值从左半平面穿越至右半平面。仿真结果验证了上述三相 Buck

变换器电压外环 PI 控制器参数对系统稳定性影响分析的正确性。

3 直流侧低频振荡抑制策略

目前电力电子装备中振荡问题的主要解决方法有改进硬件结构、改变控制参数和改进控制措施 3 种^[9,15-19]。其中,改进硬件结构在实际工程中难以应用,所以一般不采纳。电力电子装备的运行离不开控制器的设计,控制器参数直接影响了装备的稳定性,改变控制参数的方法可以在不改变装备硬件和控制器结构的情况下削弱振荡,但大量的模态分析会增加工作量,且参数的多样化使得分辨哪些参数起主导作用变得更为困难,有时改变参数也并不能抑制振荡发生。改变控制策略的方法往往行之有效,通过在现有控制方法下增加附加控制器,起到抑制振荡的作用。附加控制器的加入可以使系统的阻尼增加,提高系统的小扰动稳定性。文中将分别从改变控制器参数和增加附加控制器 2 个方面,提出抑制交直流配电网低频振荡的措施。

3.1 基于改变控制器参数的振荡抑制策略

系统的控制器参数会对系统的稳定性造成影响,就所选的 3 个主要控制参数来看, k_{ii}^{buck} 对稳定性影响不大,适当增大其值可以增加阻尼,有利于系统稳定,但当系统失稳后其值将影响系统的振荡频率。 k_{pi}^{buck} 和 k_{ii}^{buck} 变化均会影响系统稳定性,当 k_{pi}^{buck} 减小或 k_{ii}^{buck} 增大时,系统均会出现失稳的情况,在选择 Buck 变换器电压外环 PI 控制器参数时,应保证 k_{pi}^{buck} 和 k_{ii}^{buck} 不能过小或过大。当系统出现振荡失稳后,可以采用增大 k_{pi}^{buck} 或减小 k_{ii}^{buck} 的方法消除振荡,使系统恢复稳定。0~1 s 时,系统处于稳定状态,在 1 s 时,改变 Buck 变换器电压外环 PI 控制器参数,则电压的变化情况如图 13 所示。

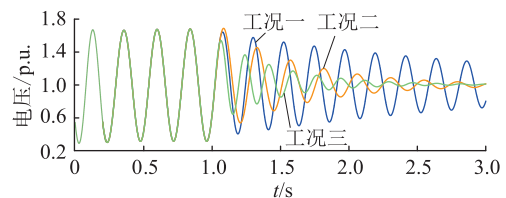


图 13 改变电压外环 PI 控制器参数对 375 V 直流侧振荡抑制的效果

Fig.13 The effect of changing the parameters of the voltage outer loop PI controller on 375 V DC side oscillation suppression

工况一:1 s 时, k_{pi}^{buck} 从 5 增大至 6,则振荡衰减,最终达到稳态值;工况二:1 s 时, k_{ii}^{buck} 从 30 减小至 12,则振荡衰减,最终达到稳态值;工况三:1 s 时, k_{pi}^{buck} 从 5 增大至 6 且 k_{ii}^{buck} 从 30 减小至 12,则振荡衰

减更快,即系统更快速地达到稳态值。可见,增大 k_{pi}^{buck} 或减小 k_{ii}^{buck} 可以抑制振荡。

3.2 基于附加控制器的振荡抑制策略

电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)是最常见的附加控制器,其通过附加稳定信号控制励磁对发电机转子振荡提供阻尼。文中参照 PSS 原理设计附加控制器,即在 Buck 变换器的控制器侧增加附加控制器,如图 14 所示。

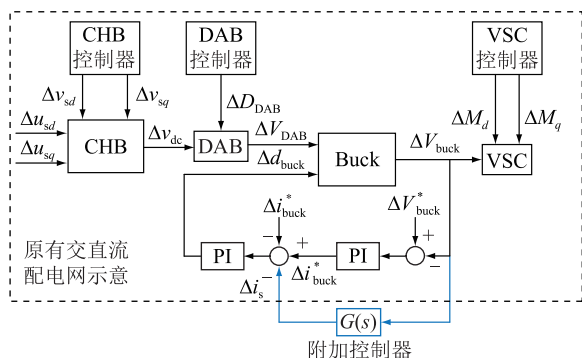


图 14 含有 Buck 附加控制器的交直流配电网示意
Fig.14 The schematic diagram of AC/DC distribution network with the Buck additional controller

Buck 变换器采用电压外环和电流内环控制方式,其中低频振荡发生在 375 V 直流侧,采集该直流侧的振荡电压作为输入源,经过附加控制器 $G(s)$,得到附加控制信号 Δi_s^* ,将该附加控制信号添加至控制器的电流比较环节,增加整个交直流配电网的阻尼,从而对振荡进行抑制。 $G(s)$ 表达式为:

$$G(s) = \frac{3}{3s + 1} \left(\frac{0.105s + 1}{0.0147s + 1} \right)^2 \quad (28)$$

分别得到 $G(s)$ 加入前后的主要特征值分布,如图 15 所示。可以看到,主要特征值将从右半平面穿越到左半平面,系统重新回到稳定状态。

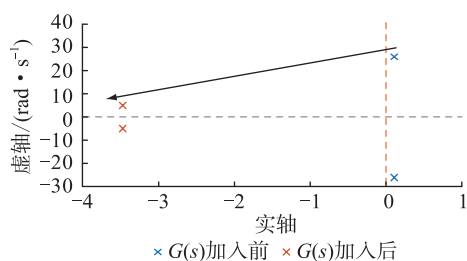


图 15 $G(s)$ 加入前后主要特征值变化趋势
Fig.15 The variation trend of main eigenvalues before and after $G(s)$ is added

$G(s)$ 加入前后的低频振荡波形对比如图 16 所示。2 s 前系统稳定运行,直流侧电压波形无振荡,2 s 时激发振荡,直流侧电压波形表现为低频振荡,3 s 时加入 $G(s)$,直流侧电压波形经过短暂的动态过程后恢复稳定。可见,该附加控制有效,能够对

振荡起到抑制作用。

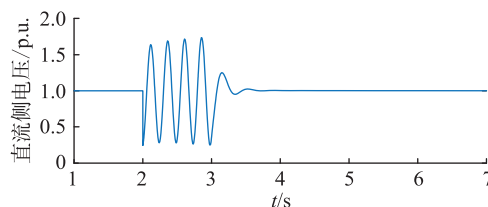


图 16 $G(s)$ 加入前后 375 V 直流侧电压变化情况
Fig.16 The variation of the voltage on the 375 V DC side before and after $G(s)$ is added

4 结论

文中基于某实际交直流配电网工程的小信号模型,开展了其小扰动下的稳定性分析,明晰了其 375 V 直流侧低频振荡发生机理。通过理论分析和仿真实验,验证了电网强度、功率水平和控制参数对直流侧低频振荡的影响,最后通过改变参数和增加附加控制器对该低频振荡进行抑制,结论如下:

(1) SCR 影响系统的稳定性。当 380 V 交流侧 SCR 变小时,VSC 端电压将发生振荡,但对 375 V 直流侧影响不大。

(2) 功率水平是影响 375 V 直流侧低频振荡的重要因素。当 375 V 直流侧功率不断增大至超过额定功率时,将会发生低频振荡,因此在实际运行中,应尽量保证系统工作在额定功率以内。

(3) 控制参数影响系统的稳定性。Buck 变换器电流内环 PI 控制器积分系数不影响系统的稳定性,但影响振荡发生后的振荡频率。Buck 变换器电压外环 PI 控制器比例系数过小或积分系数过大会造成系统不稳定,因此在运行中应保证二者在合理范围内。

(4) 文中从控制器参数和附加控制器两方面,提出了抑制低频振荡的措施。增大 Buck 变换器电压外环 PI 控制器的比例系数和减小 Buck 变换器电压外环 PI 控制器的积分系数,可以有效抑制低频振荡。在 Buck 变换器的控制器侧增加附加控制器,可以增大系统阻尼,抑制 375 V 直流侧的低频振荡。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“多端口交直流混合配电网的系统稳定机理研究”(J2020078)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 耿少博,顾乔根,常风然,等. 交直流混合配电网分布式无功电压互动控制策略[J]. 电力工程技术,2019,38(4):26-33.
GENG Shaobo, GU Qiaogen, CHANG Fengran, et al. Distributed reactive voltage and voltage interactive control strategy for AC/DC hybrid distribution network[J]. Electric Power Engineering

- Technology, 2019, 38(4):26-33.
- [2] 孟明,李宽,周晓兰. 多端交直流混合配电网的集中-分散控制策略[J]. 现代电力, 2020, 37(3):317-324.
MENG Ming, LI Kuan, ZHOU Xiaolan. Centralized-distributed-control strategy of multi-terminal AC/DC hybrid distribution network[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(3):317-324.
- [3] 王舒娅, 苏建徽, 杨向真, 等. 微电网小扰动稳定性研究综述[J]. 电气工程学报, 2016, 11(7):39-45.
WANG Shuya, SU Jianhui, YANG Xiangzhen, et al. A review on the small signal stability of microgrid[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(7):39-45.
- [4] 马添翼, 金新民, 黄杏. 含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6):12-17.
MA Tianyi, JIN Xinmin, HUANG Xing. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6):12-17.
- [5] DONG W, XIN H H, WU D, et al. Small signal stability analysis of multi-infeed power electronic systems based on grid strength assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2):1393-1403.
- [6] JAMSHIDPOUR E, NAHID-MOBARAKEH B, POURE P, et al. Distributed active resonance suppression in hybrid DC power systems under unbalanced load conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4):1833-1842.
- [7] TAHIM A P N, PAGANO D J, LENZ E, et al. Modeling and stability analysis of islanded DC microgrids under droop control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8):4597-4607.
- [8] KWASINSKI A, ONWUCHEKWA C N. Dynamic behavior and stabilization of DC microgrids with instantaneous constant-power loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3):822-834.
- [9] 吴汪平, 解大, 赵祖熠, 等. 双馈型风电系统变流器控制参数对振荡模态的影响[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7):98-107.
WU Wangping, XIE Da, ZHAO Zuyi, et al. Analysis of influence of doubly fed wind power system PI converter control parameter on oscillation mode[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(7):98-107.
- [10] INOUE K, KATO T, INOUE M, et al. An oscillation suppression method of a DC power supply system with a constant power load and a LC filter[C]//2012 IEEE 13th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Kyoto, Japan. IEEE, 2012:1-4.
- [11] DAHONO P A. A control method to damp oscillation in the input LC filter[C]//IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No. 02CH37289). Cairns, QLD, Australia. IEEE, 2002:1630-1635.
- [12] 郑超航, 李华. 弱电网下电压源型变换器静态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17):38-47.
ZHENG Chaohang, LI Hua. Static stability analysis of voltage source converters connected to a weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17):38-47.
- [13] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比:定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3):633-647.
XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3):633-647.
- [14] 张天翼, 王海风. 风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16):177-187.
ZHANG Tianyi, WANG Haifeng. Research methods for subsynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16):177-187.
- [15] WANG X F, LI Y W, BLAABJERG F, et al. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12):7019-7037.
- [16] 陈露洁, 徐式蕴, 孙华东, 等. 高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7):2297-2310.
CHEN Lujie, XU Shiyun, SUN Huadong, et al. A survey on wide-frequency oscillation for power systems with high penetration of power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7):2297-2310.
- [17] 马静, 沈雅琦, 杜延菱, 等. 适应宽频振荡的风电并网系统主动阻尼技术综述[J]. 电网技术, 2021, 45(5):1673-1686.
MA Jing, SHEN Yaqi, DU Yanling, et al. Overview on active damping technology of wind power integrated system adapting to broadband oscillation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5):1673-1686.
- [18] XING F C, XU Z, XIAO H Q, et al. Analysis on response characteristics of two-level VSC to disturbances and its oscillation suppression strategy[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(3):1389-1401.
- [19] 张佃青, 詹雄, 李芳灵, 等. SSSC型电网次同步振荡抑制器控制系统设计[J]. 电力电子技术, 2020, 54(8):96-100.
ZHANG Dianqing, ZHAN Xiong, LI Fangling, et al. Design of control system for power grid sub-synchronous oscillator suppressor of SSSC type[J]. Power Electronics, 2020, 54(8):96-100.

作者简介:



陈庆

陈庆(1962),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护、电力系统自动化和电力系统分析工作(E-mail:chen_qing@jsgcc.com);

范栋琛(1993),男,硕士,工程师,从事电力系统交直流配电网稳定分析工作;

王晨清(1987),男,博士,高级工程师,从事电力系统继电保护与控制工作。

(下转第200页)

Influence of single-phase circuit breaker tripping on inverter commutation

SONG Xinfu¹, MA Xing², LI Fengting², YIN Chunya², XIE Chao²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co.,Ltd. Economic Research Institute,Urumqi 830011,China;

2. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid

Technology (Xinjiang University), Ministry of Education,Urumqi 830047,China)

Abstract:If commutation failure does not occur when single-phase high resistance grounded in single-circuit AC line of inverter,then single-phase circuit breaker tripping may lead to commutation failure. Firstly,the expression of converter bus voltage after single-phase circuit breaker trip is derived by using symmetrical component method. Based on the expression,the main factors affecting the converter bus voltage are analyzed,and it is found that it is related to the equivalent parameters of the system. Then,the influence mechanism of voltage deviation angle of commutator bus on extinction angle is studied. It is found that the zero-crossing forward angle of commutation bus voltage after the single-phase breaker trips is the main factor leading to the decrease of the extinction angle,and commutation failure will be induced in serious cases. Finally,the AC/DC simulation model was built on the PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation software platform. The simulation verifies the effect of the tripping of single-phase breaker in single-circuit AC line on the commutation process of inverter. The simulation results are consistent with the theoretical analysis.

Keywords: commutation failure; single-phase circuit breaker; zero-crossing forward angle; extinction angle; AC/DC interconnected; symmetrical component method

(编辑 钱悦)

(上接第 125 页)

Small signal model and DC side low frequency oscillation analysis of AC/DC distribution network

CHEN Qing¹, FAN Dongchen², WANG Chenqing², LIU Wenkai³, YUAN Xiaodong², YUAN Xiaoming³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Nanjing 210024,China;2. State Grid Jiangsu Electric Power

Co.,Ltd. Research Institute,Nanjing 211103,China;3. State Key Lab of Advanced Electromagnetic

Engineering Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074,China)

Abstract:With the rapid development and wide range application of AC/DC distribution network,its stability has also become the focus. The low-frequency oscillation at the DC side in the commissioning stage of an AC/DC distribution network project is analyzed. Based on the small signal modeling,the eigenvalue analysis method is used to analyze the influence laws of short circuit ratio (SCR),power level and control parameters on low-frequency oscillation. Next,the measures of changing controller parameters and adding additional controllers to suppress oscillation are proposed. The theoretical analysis and simulation test show that weak grid affects the stability of voltage source converter (VSC). Low frequency oscillation occurs when the 375 V DC side power increases to exceed the rated power. The integral coefficient of the Buck converter current inner loop proportional integral (PI) controller does not affect the stability of the system,but it affects the oscillation frequency after the oscillation occurs. If the proportional coefficient of the voltage outer loop PI controller is too small or the integral coefficient is too large,the system is unstable. Changing voltage outer loop PI controller parameters of Buck converter and adding additional controller can effectively suppress low-frequency oscillations. The theory and simulation analysis of the actual AC/DC distribution network oscillation influence factors are of reference significance for the commissioning and operation analysis of other AC/DC distribution network projects.

Keywords: AC/DC distribution network; small signal model; eigenvalue analysis; low frequency oscillation; additional controller; oscillation suppression

(编辑 吴楠)