

电网电压暂降下配电网 SOP 系统的大信号稳定性分析及虚拟电容器控制策略

阚鹏¹, 郑华俊¹, 袁旭峰¹, 熊炜¹, 张超¹, 蔡永翔²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550002)

摘要: 智能软开关 (soft open point, SOP) 能够提供实时潮流控制、故障快速自愈和馈线负载平衡, 在配电网中得到了广泛应用。然而, 电网电压暂降 (grid voltage dips, GVD) 是典型的大扰动工况, 无法通过小信号方法分析配电网 SOP 在该工况下的稳定运行机理。为此, 采用混合势理论 (mixed potential theory, MPT) 研究了 GVD 工况下 SOP 的稳定性, 并提出了增强 SOP 稳定性的参数优化策略和虚拟电容控制策略。首先, 建立了 SOP 的非线性平均模型。在此基础上, 利用 MPT 推导出 SOP 在 GVD 条件下的大信号稳定性判据 (large signal stability criterion, LSSC)。此外, 为了增强 SOP 系统的稳定性, 基于 LSSC 提出了参数优化策略和构建虚拟电容的控制策略。最后, 通过 MATLAB/Simulink 时域仿真验证了上述方法的有效性, 即: 1) 基于 LSSC 可以有效地分析 SOP 在 GVD 下的稳定性; 2) 基于 LSSC 的系统参数优化策略和构建虚拟电容控制策略可以有效提高系统在大扰动条件下的稳定运行能力。

关键词: 电网电压暂降; 智能软开关; 混合势理论; 大信号稳定性; 虚拟电容器

Large-Signal Stability Analysis and Virtual Capacitor Control Strategy of Distribution Network SOP System Under Grid Voltage Dips

KAN Peng¹, ZHENG Huajun¹, YUAN Xufeng¹, XIONG Wei¹, ZHANG Chao¹, CAI Yongxiang²

(1. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: Soft open point (SOP) can provide real-time power flow control, fast fault self-healing and feeder load balancing, and has been widely used in distribution networks. However, grid voltage dips (GVD) are typical large disturbance conditions, and the stable operation mechanism of distribution network SOP under these conditions cannot be analyzed through small signal methods. Therefore, the mixed potential theory (MPT) is used to study the stability of SOP under GVD conditions, and the parameter optimization strategies and virtual capacitor control strategies are proposed. Firstly, a nonlinear average model of SOP is established. On this basis, the large signal stability criterion (LSSC) for SOP under GVD conditions is derived using MPT. In addition, in order to enhance the stability of the SOP system, parameter optimization strategies and control strategies for constructing virtual capacitors are proposed based on LSSC. Finally, the effectiveness of the above method is verified through MATLAB/Simulink time-domain simulation, namely: 1) based on LSSC, the stability of SOP under GVD can be effectively analyzed; 2) the system parameter optimization strategy based on LSSC and the construction of virtual capacitor control strategy can effectively improve the stable operation ability of the system under large disturbance conditions.

Key words: grid voltage dips; soft open point; mixed potential theory; large-signal stability; virtual capacitor

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52067004, 52367005, 52367019); 国家重点研发计划资助项目 (2022YFE0205300); 贵州省科技项目 (ZK[2022]一般 154; [2022]一般 012); 贵州大学引进人才科研项目 (贵大人基合字[2020] 16 号)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52067004, 52367005, 52367019); the National Key Research & Development Program of China (2022YFE0205300); the Science and Technology Project of Guizhou Province (ZK [2022] General 154; [2022] General 012); Guizhou University Talent Introduction and Scientific Research Project (Grant [2020] No.16).

0 引言

智能软开关(soft open point, SOP)提供实时潮流控制、故障的快速自愈和馈线负载的平衡^[1-3],广泛应用于配电网中,用于馈线之间的互连,以取代传统的开关^[4]。然而,基于SOP的配电网系统的稳定性受到常见且不可避免的大信号干扰严重影响,如电网电压骤降(grid voltage dips, GVD),这个问题受到越来越多的关注。

解决GVD工况下系统不稳定问题的常用方法有两种:采用低电压穿越策略和提高系统稳定性。目前,学者们已经进行了大量的研究来提高系统的低电压穿越能力^[5-7]。当电网电压暂降至较低范围时,系统将无法正常工作。此时,低电压穿越将用于通过切断部分负载并注入尽可能多的无功功率来保持有功功率平衡,以保持电压稳定。然而,当电网电压暂降程度不那么严重时(在轻负载下不触发限流),通过增强系统的稳定运行能力,系统仍然可以正常运行。在这种情况下,不需要额外的操作,并且不存在电源负载的损失。然而,保证和增强稳定性的前提是需要对系统进行稳定性分析。

近年来,许多研究人员基于线性化方法对SOP的稳定性进行了分析^[8-10]。然而,这种方法虽然可以很好地处理稳态工作点及小范围内的稳定性,但不能用于分析大扰动条件下的稳定性问题。在工程实际中,通常将小信号稳定性分析与时域仿真相结合来证明系统的稳定性。然而,仿真验证的工作点是有限的,不能保证系统的全局稳定性。同时,仿真不能提供稳定机制,不能指导工程师解决不稳定问题。目前,通常采用小信号线性化方法分析SOP系统的稳定性^[11-15]。但是GVD是典型的大信号扰动工况,小信号方法不适用,仍存在大信号不稳定的风险。因此,迫切需要对SOP进行大信号稳定性(large signal stability, LSS)研究,以避免大信号不稳定的风险。

大信号稳定性分析的研究取得了许多成果。常见的方法包括基于李雅普诺夫直接法、混合势理论(mixed potential theory, MPT)和Takagi-Sugeno模糊模型等。尽管基于李雅普诺夫直接法已广泛应用于直流微电网的大信号稳定性研究^[16-20],但没有统一的方法来构建李雅普诺夫函数。所构建的李雅普诺夫函数没有明确的物理意义,不同的李雅普诺夫

函数可能导致不同的稳定性分析结果。尽管基于Takagi-Sugeno模糊模型和Lyapunov函数理论,LSS可以进行分析^[21-22],但该方法基于数值运算,无法获得解析形式的稳定性准则来揭示研究对象的稳定运行机制。此外,Takagi-Sugeno模糊模型的维数与待研究对象的非线性环节的数量呈指数关系,因此该模型不适用于复杂的非线性系统。与上述方法相比,基于MPT的稳定性分析方法具有以下3个优点:1)混合势函数的构造方法是统一的;2)所得到的MPF与系统拓扑结构相联系,具有明显的物理意义;3)LSSC具有清晰的解析表达式,可以揭示稳定运行机理。目前,基于MPT的稳定性分析方法已应用于直流电力系统^[23-26],但其研究结果是否适用于SOP还需要进一步研究和验证。

本文引入MPT来分析柔性互联配电网中SOP系统在GVD工况下的大信号稳定性,并提出参数优化策略和虚拟电容控制策略。在获得SOP的简化非线性平均模型基础上构建了MPT,并推导了GVD工况下的大信号稳定性判据(large signal stability criterion, LSSC)。在LSSC的基础上提出了参数优化策略和虚拟电容控制策略,以提高SOP系统的稳定性。

本文第1节描述了所研究SOP的拓扑结构和控制策略,并给出系统的非线性平均模型。第2节介绍了MPT的基本原理和构建步骤,并将其应用于SOP系统,推导出了LSSC。第3节提出了参数优化策略和虚拟电容控制策略。第4节通过MATLAB/Simulink时域仿真验证了获得的LSSC、参数优化策略和虚拟电容控制策略的有效性。第5节给出了结论。

1 SOP系统及其控制

SOP可以实现馈线之间的灵活互连、有功功率传输/无功功率实时控制和四象限灵活运行^[27-30]。由背靠背模块化多电平变换器组成的双端SOP系统如图1所示。其中, V_{gabc1} 和 I_{gabc1} 分别为SOP系统整流侧交流电压和电流; P_{trans} 为SOP系统传输有功功率; L_1 和 R_{s1} 分别为SOP整流器等效电抗和电阻; L_r 和 R_r 分别为电抗和电阻。MMC任意相位的拓扑结构如图2所示。MMC中的所有子模块都是半桥臂子模块。MMC每相的上桥臂和下桥臂相当于一个电压源和一个电阻 R_{arm} 。

严重的GVD可能导致PLL工作不稳定,但这个

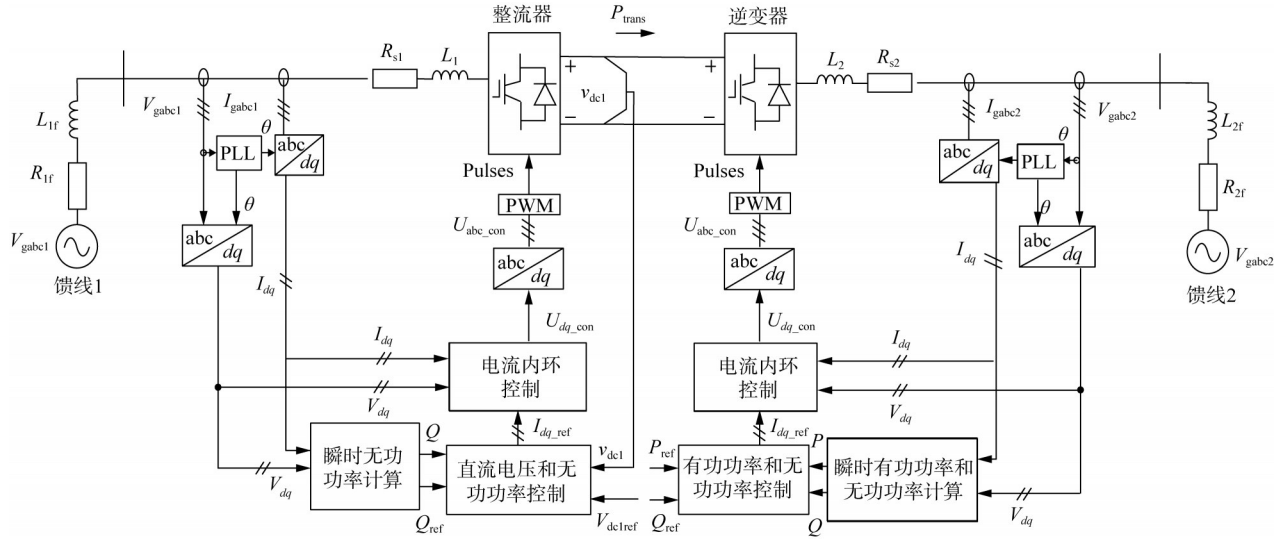


图 1 双端 SOP 系统及其控制

Fig. 1 Two-terminal SOP system and its control

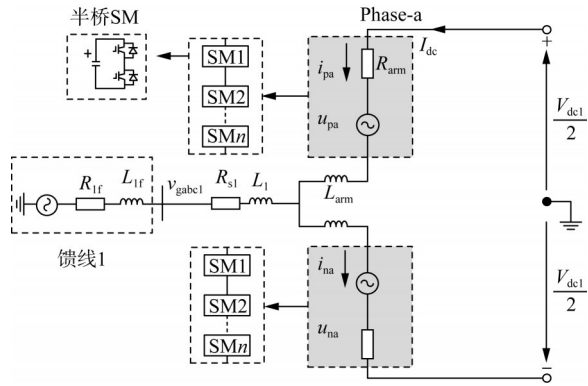


图 2 单相 MMC 原理图

Fig. 2 Schematic diagram of single-phase MMC

问题得到了很好的解决^[31-34]。因此,在本研究中 PLL 始终可以稳定运行。SOP 采用了 dq 参考系下的典型双环控制,如图 1 所示。SOP 的整流器和逆变器外环分别由 P - v_{dc} 和 P - Q 控制。由于在逆变器中使用了 P - Q 控制,在本文研究的 GVD 条件下,有功功率传输命令保持不变。因此,SOP 的逆变器侧呈现恒定功率负载(constant power load, CPL)特性^[35]。控制方程可以从整流器模型中获得,如式(1)所示。

$$\begin{cases} i_{d1ref} = k_{vp1}(V_{dc1ref} - v_{dc1}) + k_{vil} \int (V_{dc1ref} - v_{dc1}) dt \\ v_{kd1} = v_{gd1} + \omega L_1 i_{q1} - \\ \quad \left\{ k_{ip1}(i_{d1ref} - i_{d1}) + k_{iil} \int (i_{d1ref} - i_{d1}) dt \right\} \\ v_{kq1} = v_{gq1} - \omega L_1 i_{d1} - \\ \quad \left\{ k_{ip1}(i_{q1ref} - i_{q1}) + k_{iil} \int (i_{q1ref} - i_{q1}) dt \right\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{d1ref} 、 i_{q1ref} 为整流站 dq 轴电流参考值; v_{kd1} 和 v_{kq1} 分别为整流器 dq 轴控制电压; k_{vp1} 和 k_{ip1} 为整流器双环控制比例系数; v_{gd1} 和 v_{gq1} 分别为整流器电压 dq 分量; ω 为交流电网角频率; L_1 为交流系统电感; i_{d1} 和 i_{q1} 分别为整流器电流 dq 分量; k_{vil} 和 k_{iil} 为整流器双环控制积分系数; V_{dc1ref} 为直流侧参考电压; v_{dc1} 和 i_{dc1} 分别为直流电压和电流。

类似地,可以获得逆变器的数学模型和控制方程。

2 基于 MPT 的大信号稳定性分析

GVD 是一种典型的大信号扰动工况,可能由三相接地故障、大型感应电机启动和雷击等引起,此时小信号线性化方法不适用。为此,本文采用 MPT 分析了 GVD 工况下 SOP 系统的大信号稳定性。

2.1 MPT 介绍

混合势函数 $P(i, v)$ 的一般形式如式(2)所示。

$$P(i, v) = -A(i) + B(v) + C(i, \gamma v) \quad (2)$$

式中: $A(i)$ 为电流势函数; $B(v)$ 为电压势函数; $C(i, \gamma v)$ 为电容器和其他非储能元件的电压和电流的乘积。式(3)反映了系统模型与 $P(i, v)$ 之间的关系,同时可用于验证所获得的 $P(i, v)$ 的正确性。

$$\begin{cases} \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_\lambda} = L_\lambda \frac{di_\lambda}{dt} \\ \frac{\partial P(i, v)}{\partial v_\sigma} = -C_\sigma \frac{dv_\sigma}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_λ 、 v_σ 分别为电感电流和电容电压; L_λ 、 C_σ

分别为电感矩阵和电容矩阵。李雅普诺夫候选函数可以构造为:

$$P^*(i, v) = \frac{\mu_1 - \mu_2}{2} P(i, v) + \frac{1}{2} (P_i, L^{-1} P_i) + \frac{1}{2} (P_v, C^{-1} P_v) \quad (4)$$

式中: $P_i = \partial P(i, v) / \partial i$, $P_v = \partial P(i, v) / \partial v$; μ_1 和 μ_2 分别为矩阵 $L^{-1} A_{ii}(i) L^{-1}$ 和 $C^{-1} B_{vv}(v) C^{-1}$ 的最小特征值, 其中 $A_{ii}(i)$ 为通过计算 $A(i)$ 相对于 i 的二阶偏微分矩阵, $B_{vv}(v)$ 为通过计算 $B(v)$ 相对于 v 的二阶偏微分。

根据MPT: 如果 $\mu_1 + \mu_2 > 0$, 对于所有 i 和 v , 当 $|i| + |v| \rightarrow \infty$, $P^*(i, v) \rightarrow \infty$, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时系统的所有解都趋近于稳态工作点。

2.2 基于MPT的大信号稳定性分析步骤

基于MPT的SOP系统的大信号稳定性分析过程如图3所示。主要过程可分为如下几个步骤。

- 1) 步骤1: 建立等效非线性平均模型;
- 2) 步骤2: 根据模型建立混合势函数;
- 3) 步骤3: 验证已建立的混合势函数的正确性;
- 4) 步骤4: 基于正确的混合势函数推导LSSC;
- 5) 步骤5: 根据LSSC判断所研究系统的稳定性, 分析系统参数对稳定性的影响。

2.3 将MPT应用于SOP系统

根据图3所示的步骤, 分析了配电网中SOP在GVD工况下的大信号稳定性。如图4所示, 建立了SOP系统的非线性平均模型^[36], 如式(5)~(6)所示。

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{d1}}{dt} = v_{gd1} - v_{kd1} - (R_{s1} + R_{1f}) i_{d1} + \omega L_1 i_{q1} \\ L_1 \frac{di_{q1}}{dt} = v_{gq1} - v_{kq1} - (R_{s1} + R_{1f}) i_{q1} - \omega L_1 i_{d1} \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{o1} = \frac{3(V_{kd1} I_{d1} + V_{kq1} I_{q1})}{2V_{dc1}} \quad (6)$$

式中: R_{s1} 和 R_{1f} 分别为交流系统电感和电源内阻; I_{o1} 为等效受控电流源幅值; V_{kd1} 和 V_{kq1} 分别为整流器控制电压稳态值; I_{d1} 和 I_{q1} 分别为整流站 dq 轴电流稳态值; V_{dc1} 为直流电压稳态值。

考虑到每个子模块的电容电压相等, 每个子模块直流电压为 u_d/n , 即:

$$\frac{1}{2} C_d u_d^2 = \frac{1}{2} C_0 \left(\frac{u_d}{n} \right)^2 \times 6n \quad (7)$$

通过简化得:

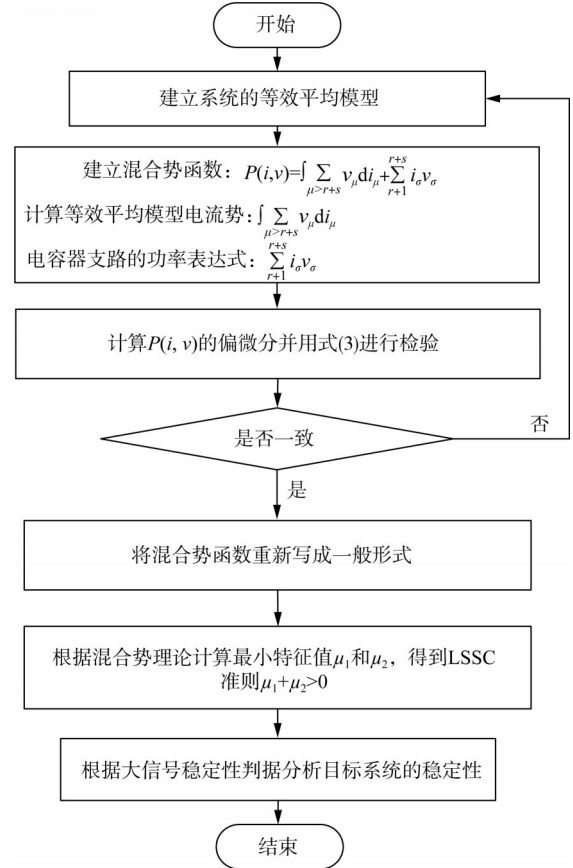


图3 基于MPT的大信号稳定性分析流程

Fig. 3 Large signal stability analysis process based on MPT

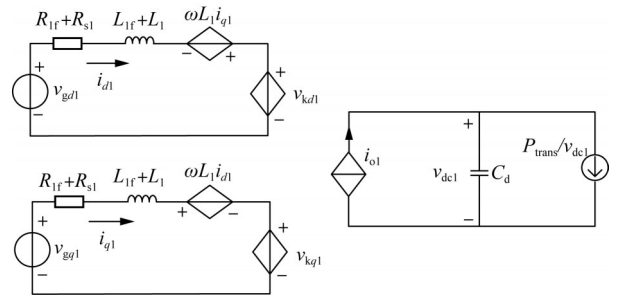


图4 SOP系统的非线性平均模型

Fig. 4 Nonlinear average model of SOP system

$$C_d = \frac{6}{n} C_0 \quad (8)$$

式中: C_d 为MMC等效直流电容; C_0 为MMC子模块电容; n 为子模块数量; u_d 为子模块电容电压。

至此, 得到了图1所示的系统平均模型。

下面将描述使用MPT分析SOP系统大信号稳定性的详细过程。混合势函数的建立分为两部分, 即非储能元件的电流势函数和电容支路的电压电流乘积。

首先, 非储能元件的电流势函数可以表示为:

$$\begin{aligned} \int_{\mu > r+s} v_{\mu} di_{\mu} &= \int_0^{i_{d1}} \{v_{gd1} - v_{kd1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{d1} + \omega L_1 i_{q1}\} di_{d1} + \\ &\int_0^{i_{q1}} \{v_{gq1} - v_{kq1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{q1} - \omega L_1 i_{d1}\} di_{q1} + \\ &\int_0^{i_{o1}} v_{dc1} di_{o1} - \int_0^{\frac{P_{trans}}{v_{dc1}}} v_{dc1} d\frac{P_{trans}}{v_{dc1}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: r 为电感支路数量; s 为电容支路数量; v_{μ} 和 i_{μ} 分别为非储能元件支路的电压和电流; i_{o1} 为中间变量; P_{trans} 为 SOP 系统传输的有功功率。

其次, 电容支路的电压电流乘积为:

$$\sum_{r+1}^{r+s} i_{\sigma} v_{\sigma} = -(i_{o1} - \frac{P_{trans}}{v_{dc1}}) v_{dc1} \quad (10)$$

则 SOP 系统的混合势函数为:

$$\begin{aligned} P(i, v) &= \int_{\mu > r+s} v_{\mu} di_{\mu} + \sum_{r+1}^{r+s} i_{\sigma} v_{\sigma} \\ &= \int_0^{i_{d1}} \{v_{gd1} - v_{kd1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{d1} + \omega L_1 i_{q1}\} di_{d1} + \\ &\int_0^{i_{q1}} \{v_{gq1} - v_{kq1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{q1} - \omega L_1 i_{d1}\} di_{q1} + \\ &\int_0^{v_{dc1}} \frac{P_{trans}}{v_{dc1}} dv_{dc1} - \int_0^{v_{dc1}} i_{o1} dv_{dc1} \end{aligned} \quad (11)$$

根据混合势函数与模型之间的关系, 得出式 (12)。它与式 (3) 一致, 证明了所获得的混合势函数的正确性。

$$\begin{cases} \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_{d1}} = v_{gd1} - v_{kd1} + \omega L_1 i_{q1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{d1} = L_1 \frac{di_{d1}}{dt} \\ \frac{\partial P(i, v)}{\partial i_{q1}} = v_{gq1} - v_{kq1} - \omega L_1 i_{d1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{q1} = L_1 \frac{di_{q1}}{dt} \\ \frac{\partial P(i, v)}{\partial v_{dc1}} = -i_{o1} + \frac{P_{trans}}{v_{dc1}} = -C_d \frac{dv_{dc1}}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

将式 (11) 改写为如式 (2) 所示的混合势函数一般形式, 其中:

$$\begin{aligned} A(i) &= -\int_0^{i_{d1}} \{v_{gd1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{d1} - v_{kd1} + \omega L_1 i_{q1}\} di_{d1} - \\ &\int_0^{i_{q1}} (v_{gq1} - (R_{s1} + R_{1f})i_{q1} - v_{kq1} - \omega L_1 i_{d1}) di_{q1} \end{aligned} \quad (13)$$

$$B(v) = -\int_0^{v_{dc1}} i_{o1} dv_{dc1} + \int_0^{v_{dc1}} \frac{P_{trans}}{v_{dc1}} dv_{dc1} \quad (14)$$

然后, 对电流和电压势函数进行二阶偏导数运算。

$$A_{ii}(i) = \frac{\partial^2 A(i)}{\partial i^2} = \begin{bmatrix} R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1} & 0 \\ 0 & R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} B_{vv}(v) &= \frac{\partial^2 B(v)}{\partial v^2} \\ &= -\frac{3I_{d1}(k_{vp1}k_{ip1}V_{dc1} - v_{gd1} + (R_{s1} + R_{1f})I_{d1})}{2V_{dc1}^2} - \\ &\frac{3I_{q1}(v_{gq1} - (R_{s1} + R_{1f})I_{q1})}{2V_{dc1}^2} - \frac{P_{trans}}{V_{dc1}^2} \end{aligned} \quad (16)$$

根据系统结构可以得到电感矩阵和电容分别为:

$$L = \begin{bmatrix} L_1 + L_{1f} & 0 \\ 0 & L_1 + L_{1f} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C = C_d \quad (18)$$

式中 L_{1f} 为交流电源电抗。

因此, 根据式 (15)~(18) 可以得到 $L^{-1/2}A_{ii}(i)L^{-1/2}$ 和 $C^{-1/2}B_{vv}(v)C^{-1/2}$ 如下。

$$L^{-1/2}A_{ii}(i)L^{-1/2} = \begin{bmatrix} \frac{R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1}}{L_1 + L_{1f}} & 0 \\ 0 & \frac{R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1}}{L_1 + L_{1f}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} C^{-1/2}B_{vv}(v)C^{-1/2} &= -\frac{3I_{d1}(k_{vp1}k_{ip1}V_{dc1} - v_{gd1} + (R_{s1} + R_{1f})I_{d1})}{2C_d V_{dc1}^2} - \\ &\frac{3I_{q1}(v_{gq1} - (R_{s1} + R_{1f})I_{q1})}{2C_d V_{dc1}^2} - \frac{P_{trans}}{C_d V_{dc1}^2} \end{aligned} \quad (20)$$

应用 MPT, $L^{-1/2}A_{ii}(i)L^{-1/2}$ 和 $C^{-1/2}B_{vv}(v)C^{-1/2}$ 的最小特征值为:

$$\mu_1 = \min\left(\frac{R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1}}{L_1 + L_{1f}}, \frac{R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1}}{L_1 + L_{1f}}\right) \quad (21)$$

和

$$\begin{aligned} \mu_2 &= -\frac{3I_{d1}(k_{vp1}k_{ip1}V_{dc1} - v_{gd1} + (R_{s1} + R_{1f})I_{d1})}{2C_d V_{dc1}^2} - \\ &\frac{P_{trans}}{C_d V_{dc1}^2} - \frac{3I_{q1}(v_{gq1} - (R_{s1} + R_{1f})I_{q1})}{2C_d V_{dc1}^2} \end{aligned} \quad (22)$$

最后, 根据 MPT, 双端 SOP 系统的 LSSC 为:

$$\begin{aligned} \min\left(\frac{R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1}}{L_1 + L_{1f}}, \frac{R_{s1} + R_{1f} + k_{ip1}}{L_1 + L_{1f}}\right) - \\ \frac{3I_{d1}(k_{vp1}k_{ip1}V_{dc1} - v_{gd1} + (R_{s1} + R_{1f})I_{d1})}{2C_d V_{dc1}^2} - \\ \frac{P_{trans}}{C_d V_{dc1}^2} - \frac{3I_{q1}(v_{gq1} - (R_{s1} + R_{1f})I_{q1})}{2C_d V_{dc1}^2} > 0 \end{aligned} \quad (23)$$

3 增强系统大信号稳定性策略

为了增强系统的大信号稳定性,本文提出了两种基于LSSC的策略。首先,根据所获得的准则对系统参数进行优化以提高系统的稳定性。然而,由于系统本身的特点和设备本身的局限性,这种策略具有一定的局限性。在此基础上,提出了增加虚拟电容器以提高稳定性的策略。这种方法可以在不增加成本的情况下有效地达到增强系统稳定性的目的。

3.1 参数优化策略

在获得LSSC之后,详细分析了每个参数对大信号稳定性的影响。SOP的参数如表1所示。

表1 SOP系统参数
Tab. 1 SOP system parameters

参数	数值
电网电压 $v_{gabc1}, v_{gabc2}/kV$	10
子模块电容平均电压/V	1 000
直流侧电压 V_{dc1}/kV	20
子模块数量 n	20
系统频率 f/Hz	50
开关频率 f_c/Hz	2 000
子模块电容 $C_0/\mu F$	6 000
MMC桥臂电感 L_{arm}/H	0.0131
SOP整流站侧交流阻抗 $(R_{s1}, \Omega, L_{s1}/H)$	(0.092 9, 0.002 1)
SOP系统整流站直流电压控制器 (k_{vp1}, k_{vi1})	(0.064 8, 21)
SOP系统整流站电流内环控制器 (k_{ip1}, k_{ii1})	(4, 170)
SOP系统逆变站有功功率控制器 (k_{pp2}, k_{pi2})	(7.11×10 ⁻⁵ , 0.005 3)
SOP系统逆变站电流内环控制器 (k_{ip2}, k_{ii2})	(4, 170)

基于判据式(23),系统参数 k_{vp1} 、 k_{ip1} 、 R_{s1} 、 L_1 和 C_d 等将影响 $\mu_1 + \mu_2$ 的振幅。具体分析如下。

首先,以电流内环参数 k_{ip1} 为例,研究了控制器参数对大信号稳定性的影响。从判据式(23)可以看出, k_{ip1} 与判据的第一项 μ_1 呈正相关,与判据的第二项 μ_2 负相关。以系统传输功率 P_{trans} 为参考,制作 $\mu_1 + \mu_2 = f(k_{ip1}, P_{trans})$ 的三维图,如图5(a)所示。分析可知,增加 k_{ip1} 有利于提高系统的稳定性。然而,在GVD工况下电压暂降幅度越大,系统越趋于不稳定,需要增大 k_{ip1} 保证系统稳定。然而 k_{ip1} 的取值有一定的范围限制。一般在设计变换器时要求电流内环的截止频率远小于开关频率,通常取开关频率的1/10。增大比例系数,截止频率随之增大。由于

截止频率受限,比例系数也受限。因此,仅调整 k_{ip1} 的幅度可能无法保证SOP的全局大信号稳定性。

其次,以 L_1 为代表分析了电网强度对系统稳定性的影响。 $\mu_1 + \mu_2 = f(L_1, P_{trans})$ 的三维图如图5(b)所示。显然,随着 L_1 的增加SOP的稳定性逐渐减弱。

然后,以 C_d 为代表分析了主电路参数对系统稳定性的影响。 $\mu_1 + \mu_2 = f(C_d, P_{trans})$ 的三维图如图5(c)所示。可以看出,增加电路参数 C_d 有利于提高大信号稳定性。

最后,分析了电网电压暂降幅值对系统稳定性的影响。 $\mu_1 + \mu_2 = f(k_{vp1}, V_{gd1})$ 的三维图如图5(d)所示。可以得出结论,SOP的稳定性随着电压骤降幅度的增加而降低。

综上所述,对于 L_1 ,尽管它是影响系统稳定性的因素,但很难通过主动调节来改变其幅值。对于主电路参数 C_d ,虽然它会影响系统的稳定性,但由于工艺、成本、体积等因素的限制,通过增加 C_d 很难达到提高系统稳定性的目的。

3.2 虚拟电容策略

针对上述问题,本文提出了一种通过在直流侧设置与 C_d 并联的虚拟电容器 C_{vi1} 来等效增加 C_d 幅值的策略,如图6所示。使 C_d 增加到 $C_d + C_{vi1}$,以增强系统的稳定性。所获得的LSSC如式(24)所示。

$$\min \left(\frac{R_{s1} + R_{lf} + k_{ip1}}{L_1 + L_{lf}}, \frac{R_{s1} + R_{lf} + k_{ip1}}{L_1 + L_{lf}} \right) - \frac{3I_{d1}(k_{vp1}k_{ip1}V_{dc1} - v_{gd1} + (R_{s1} + R_{lf})I_{d1})}{2(C_d + C_{vi1})V_{dc1}^2} - \frac{\frac{P_{trans}}{(C_d + C_{vi1})V_{dc1}^2} - \frac{3I_{q1}(v_{gq1} - (R_{s1} + R_{lf})I_{q1})}{2(C_d + C_{vi1})V_{dc1}^2}}{2(C_d + C_{vi1})V_{dc1}^2} > 0 \quad (24)$$

式中 C_{vi1} 为虚拟电容。

在图6中,引入了虚拟电容 C_{vi1} 以实现等效增加直流电容 C_d 的效果。将节点电流方程表示为:

$$i_{o1} = C_d \frac{dv_{dc1}}{dt} + i_{vi1} + i_{p_{trans}} \quad (25)$$

式中: i_{vi1} 为虚拟电容器电流; $i_{p_{trans}}$ 为系统传输功率下流经的电流。

但实际上,不存在与虚拟电容 C_{vi1} 相对应的装置。因此,为了保持虚拟电容 C_{vi1} 的电容特性但不真正呈现电容,需要预先从整流站的输出电流中减去虚拟电容 C_{vi1} 的电流,即:

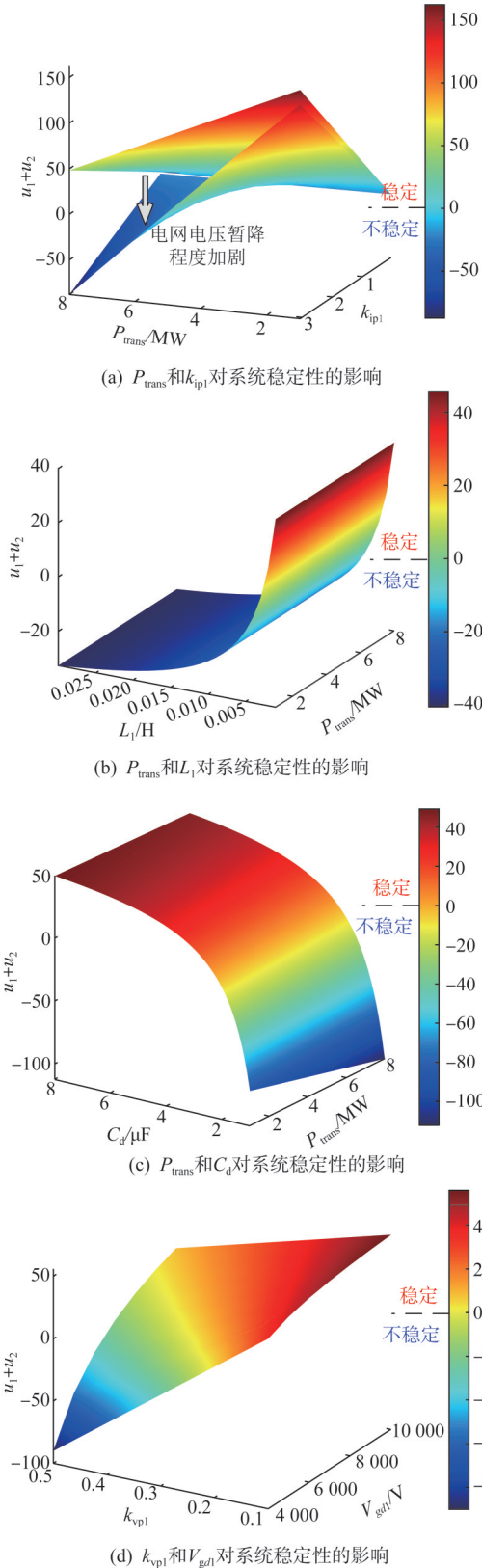
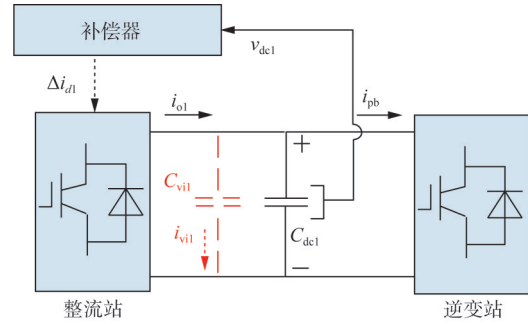


图5 影响系统稳定性的因素的三维图

Fig. 5 Three-dimensional diagram of factors affecting system stability

图6 整流站直流侧的并联虚拟电容器 C_{vil} Fig. 6 Parallel virtual capacitor C_{vil} on DC side of rectifier station

$$i_{\text{o1_real}} = i_{\text{o1}} - i_{\text{vil}} = C_d \frac{dv_{\text{dc1}}}{dt} + i_{P_{\text{trans}}} \quad (26)$$

式中 $i_{\text{o1_real}}$ 为添加虚拟电容器后整流器的实际输出电流。

为了引入虚拟电容 C_{vil} ，整流站需要减少额外的功率 P_{vil} 。因此，在整流器输出电压不变的前提下，其输出电流需要减小 $\Delta i_{\text{o1}} = \Delta i_{\text{vil}}$ 。

$$P_{\text{vil}} = v_{\text{dc1}} i_{\text{vil}} = v_{\text{dc1}} C_{\text{vil}} \frac{dv_{\text{dc1}}}{dt} \quad (27)$$

从能量的角度来看，交流电网的输出功率等于整流器侧变流器内部消耗的功率加上整流器侧变流器直流侧输出的功率。通过改变整流器侧转换器的 i_{d1} ，交流电网的输出功率可以减少 P_{vil} ，相当于构建虚拟电容器所需的功率，即

$$\frac{3}{2} v_{\text{gd1}} \Delta i_{\text{d1}} = v_{\text{dc1}} \Delta i_{\text{o1}} \quad (28)$$

因此，可以在整流器侧转换器的控制系统中添加电流回路，以实现虚拟电容 C_{vil} 的添加。计算 Δi_{d1} 后，将其与参考信号 i_{d1ref} 相加，以改变整流器的 i_{d1} 。

到目前为止，通过改变 k_{ip1} 来调整 μ_1 的幅值，通过改变 C_{vil} 来调整 μ_2 的幅值。两种方法的结合可以增强 $\mu_1 + \mu_2$ 的可控性，并在更宽的范围内增强 SOP 的大信号稳定性。

4 仿真实验

在 MATLAB/Simulink 中实现了 GVD 条件下 SOP 的仿真，证明了所获得的 LSSC 的有效性、参数优化策略的可行性以及使用虚拟电容器控制提高稳定性的有效性。

4.1 GVD 工况下 SOP 系统得 LSSC 验证

在保证通用性的前提下，选择任意系统运行工况作为代表，研究所获得判据的正确性(本文以

$P_{\text{trans}}=8 \text{ MW}$ 为例)。首先,根据获得的LSSC, V_{gd1} 和 $\mu_1+\mu_2$ 之间的关系如图7所示。可以得出,电网额定电压的临界值为43%。也就是说,当 V_{gd1} 低于43%时,SOP系统将无法稳定运行。相反,SOP系统可以保持稳定。取临界值附近的两个工作点(O_{p1} 和 O_{p2}),其中 O_{p1} 和 O_{p2} 分别为电网额定值的45%和40%。由于系统处于轻负载状态,因此在上述操作点不会出现电流限制。根据LSSC,可以确定 O_{p1} 可以正常工作,而 O_{p2} 不能正常工作。仿真结果如图8所示,证明了上述分析结果的正确性。

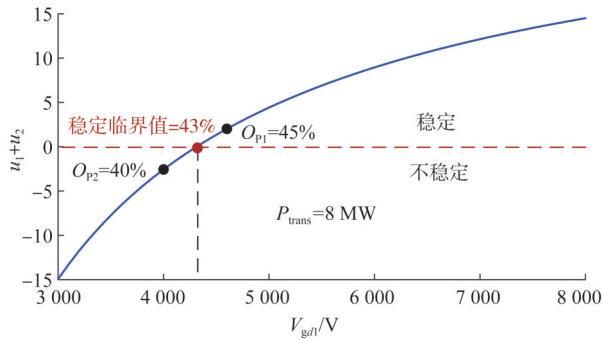


图7 电网电压暂降幅值与系统稳定性之间的关系

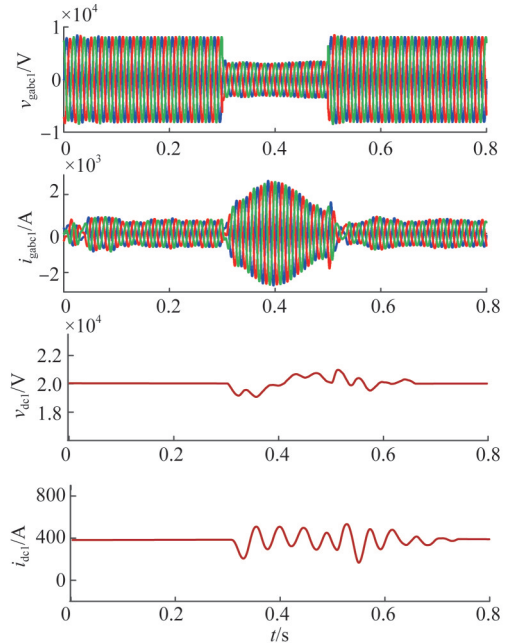
Fig. 7 Relationship between grid voltage dip amplitudes and system stabilities

4.2 参数优化策略验证

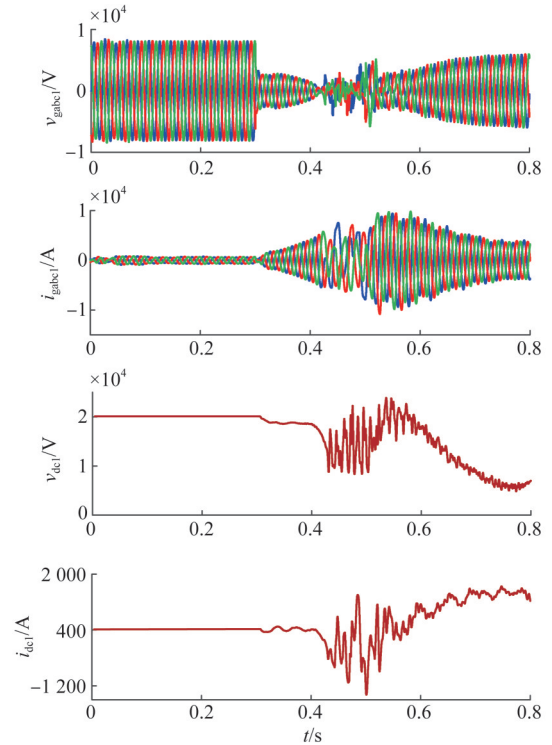
对于操作点 O_{p2} 的不稳定性,重新调整系统参数以满足LSSC。在投入运行之前,可以通过重新调整系统参数来提升SOP系统的大信号稳定性。

本文以 k_{ip1} 为例,研究了控制器参数对系统稳定性的增强作用。根据获得的MPT判据式(23)确定了不同 k_{ip1} , SOP系统在GVD工况下的稳定性范围,如图9所示。可以得出,在一定范围内,增加控制参数 k_{ip1} 可以增加 $\mu_1+\mu_2$, 使系统从不稳定变为稳定。然而,当电网电压跌落幅值降低至40%以下后,尽管增大 k_{ip1} 到极限值仍然不能解决其不稳定性问题。图10的模拟结果可以通过再次运行图8(b)所示的工况来获得。可以分析,当电网电压跌落至40%时,参数优化后的系统可以保持稳定运行。

尽管根据稳定性准则可知,可以通过增加 k_{ip1} 来增强系统的大信号稳定性,但由于 k_{ip1} 取值受限,仅改变 k_{ip1} 不适用所有不稳定情况,如图11所示。此时, k_{ip1} 仍为5,但电网电压暂降至35%,系统不能维持稳定运行。因此,在解决不稳定问题时,可能需要联合优化多个参数,以增强其稳定性的可调



(a) SOP直流/交流侧电压和电流瞬态波形: v_{gd1} 100%→45%



(b) SOP直流/交流侧电压和电流瞬态波形: v_{gd1} 100%→40%

图8 GVD下SOP系统的暂态波形

Fig. 8 Transient waveform of SOP under GVD

范围。

根据LSSC,除了调整控制器参数外,还可以调整主电路参数,以增强系统的LSS。本文以等效主电路参数 C_d 为例,研究了主电路参数对稳定性的

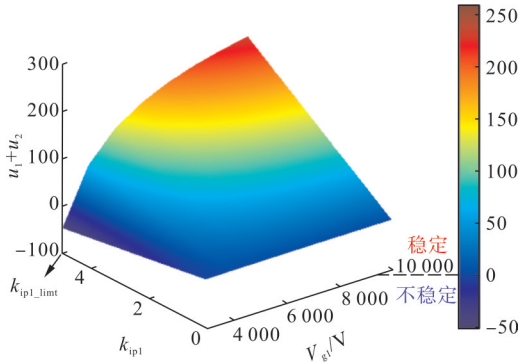


图9 GVD工况下增大 k_{ip1} 对系统稳定性的影响

Fig. 9 Effect of increasing k_{ip1} on system stability under GVD conditions

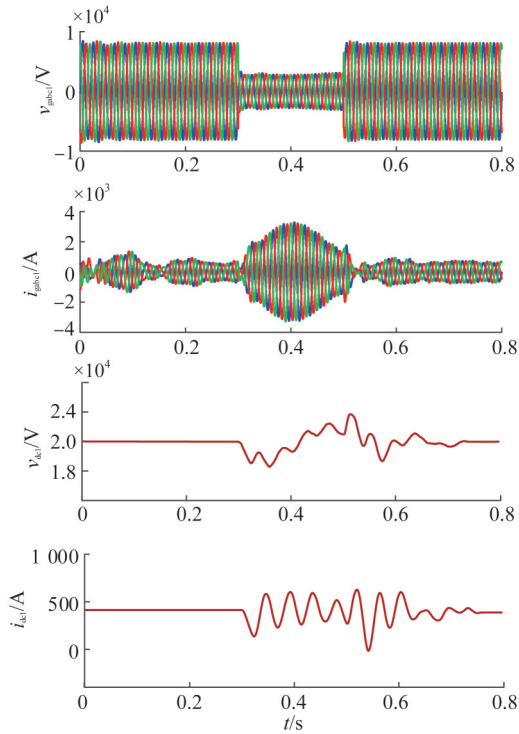


图10 电网电压跌落至40%且 $k_{ip1}=5$ 时,系统正常运行

Fig. 10 When the grid voltage dips to 40 % and $k_{ip1}=5$, the system operates normally

增强作用。对于图8(b)中的运行工况,将 C_d 从1 800 μF 增加到2 000 μF 可以使系统满足LSSC,仿真结果如图12所示。显然,系统在增加 C_d 后可以保持稳定运行。

4.3 虚拟电容器控制策略有效性验证

在实际应用中,主电路参数的设计是一个复杂的过程,需要考虑设备体积和成本等诸多因素。因此,修改主电路参数以提高系统稳定性的方案可能不容易实现。针对这一问题,本文研究了通

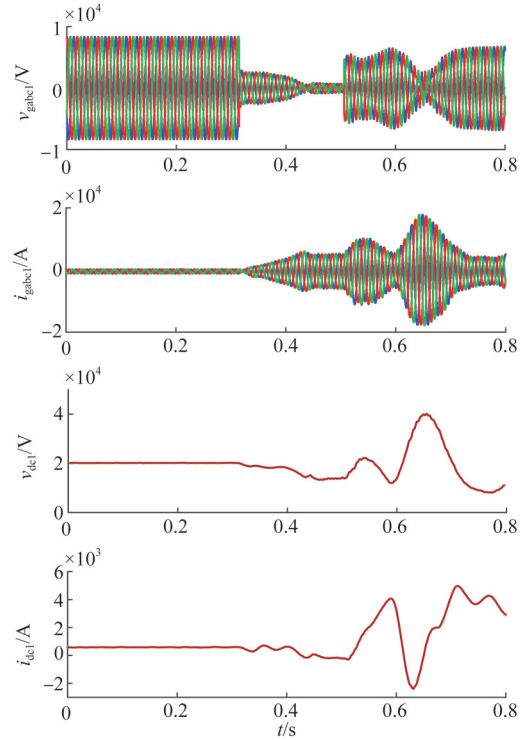


图11 电网电压暂降至35%且 $k_{ip1}=5$ 时,系统失稳

Fig. 11 When the grid voltage dips to 35% and $k_{ip1}=5$, the system becomes unstable

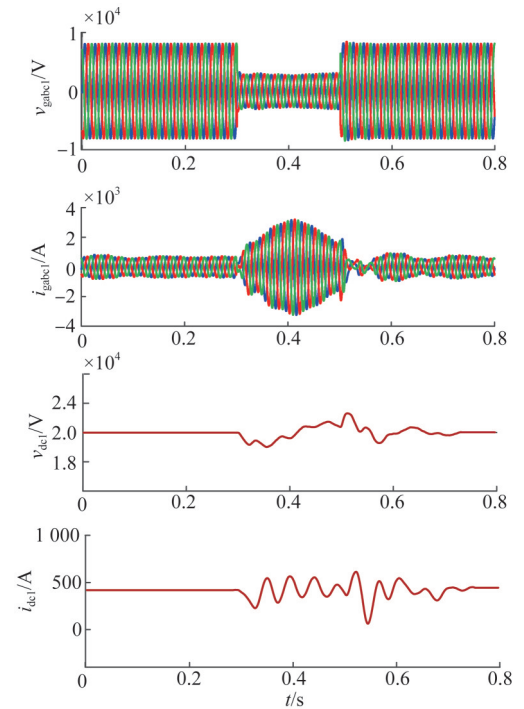


图12 电网电压暂降至40%, $C_d=2\,000\,\mu\text{F}$ 时,系统正常运行

Fig. 12 When the grid voltage dips to 40 % and $C_d = 2\,000\,\mu\text{F}$, the system operates normally

过增加虚拟电容来提高 C_d 幅值的方法, 该方法可以在不增加设备和成本的情况下提高 SOP 的大信号稳定性。

首先, 在相同的工作模式下, 研究了虚拟电容和实际电容对 SOP 系统动态性能的影响。在原始系统中, $C_d=1\ 800\ \mu\text{F}$ 。为了验证所构建的虚拟电容 C_{vi1} 可以在一定程度上等同于真实电容, 比较了如表 2 所示的几组实际电容与虚拟电容组合的情况, 时域仿真结果如图 13 所示。可以看出, 在一定范围内, 虚拟电容占比从小到大, 与实际电容相比具有较小的误差, 即在一定范围内虚拟电容可以等效实现实际电容的功能。

表 2 虚拟电容与实际电容占比分析数据

Tab. 2 Analysis data of virtual capacitance and actual capacitance ratios

数据组	实际电容值/ μF	虚拟电容值/ μF	虚拟电容占比/%
第一组	1 800	0	0
第二组	1 500	300	16.7
第三组	1 200	600	33.3
第四组	900	900	50

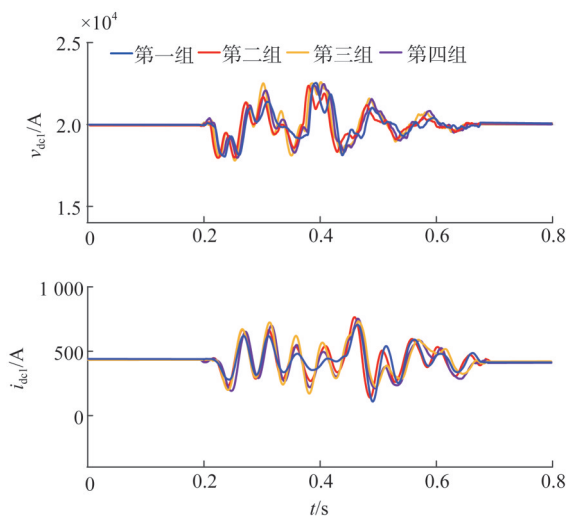


图 13 虚拟电容占比不同对系统影响程度

Fig. 13 Impact of different proportions of virtual capacitors on the system

对于工作点 O_{p2} 的不稳定性, 这里通过并联整流器输出端的虚拟电容器 $C_{vi1}=200\ \mu\text{F}$ 来等效地增加 C_d 。添加虚拟电容后, 系统可以在这种工作条件下稳定运行, 如图 14 所示。仿真结果验证了该方法的正确性。

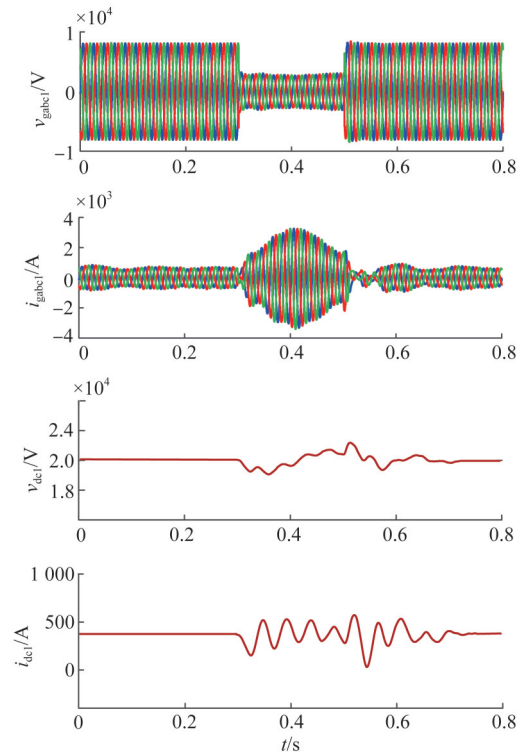


图 14 电网电压暂降至 40 %, 增加虚拟电容 $C_{vi1}=200\ \mu\text{F}$ 时, 系统正常运行

Fig. 14 When the grid voltage temporarily drops to 40 % and the virtual capacitor $C_{vi1}=200\ \mu\text{F}$, the system operates normally

5 结语

GVD 可能会导致系统的不稳定, 常用的线性化方法是不合适的。本文将 MPT 应用于配电网 SOP 系统 GVD 工况下的大信号稳定性分析。在此基础上, 提出了一种利用虚拟电容器增强系统稳定性的控制策略。首先, 在建立非线性平均模型的基础上, 利用 MPT 推导出基于 SOP 系统的 LSSC。基于稳定性准则, 分析了影响 SOP 稳定性的因素, 提出了系统参数的优化策略。考虑到修改主电路参数的复杂性, 提出了虚拟电容器的控制策略。最后, 通过 MATLAB/Simulink 验证了所提出的大信号稳定性分析方法和构建虚拟电容的控制策略的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 李岩, 陈夏, 李巍巍, 等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性配电网互联结构与控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4749–4759.
LI Yan, CHEN Xia, LI Weiwei, et al. Research on interconnection structure and control technology of flexible distribution

- network based on soft open point in parallel with interconnection switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4749 – 4759.
- [2] 倪伟东, 范心明, 孙广慧, 等. 基于元模型的智能软开关就地控制策略优化方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(7): 73 – 80. NI Weidong, FAN Xinming, SUN Guanghui, et al. Optimization method of local control strategy of soft open point based on metamodel[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 73 – 80.
- [3] 徐来烽, 张沈习, 叶琳浩, 等. 考虑动态重构和智能软开关接入的配电网源网荷储联合规划[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 130 – 140. XU Laifeng, ZHANG Shenxi, YE Linhao, et al. Joint planning of source-network-load-storage in distribution network considering dynamic reconfiguration and intelligent soft open point[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 130 – 140.
- [4] 贾善翔, 彭克, 李喜东, 等. 基于智能软开关的柔性互联交直流配电系统分布式优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 95 – 103. JIA Shanxiang, PENG Ke, LI Xidong, et al. Distributed optimization of flexible interconnected AC/DC distribution system based on soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 95 – 103.
- [5] 郭强, 王鹤, 聂永辉, 等. 考虑恢复暂态过程的直驱发电系统低电压穿越模型参数解耦辨识方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3430 – 3440. GUO Qiang, WANG He, NIE Yonghui, et al. Decoupling identification method of low-voltage ride-through model parameters of direct drive power generation system considering recovery transient process[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3430 – 3440.
- [6] JI L, SHI J, HONG Q, et al. A multi-objective control strategy for three phase grid-connected inverter during unbalanced voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2490 – 2500.
- [7] HOU L, ZHANG S, WEI Y, et al. A hybrid-arm modular multilevel converters topology with DC low voltage operation and fault ride-through capability for unidirectional HVDC bulk power transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2812 – 2820.
- [8] 李清, 张连升, 毛炽祖, 等. MMC-HVDC 系统小信号阻抗建模及稳定性分析[J]. 南方电网技术, 2021, 15(7): 1 – 10. LI Qing, ZHANG Liansheng, MAO Chizu, et al. Small signal impedance modeling and stability analysis of MMC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(7): 1 – 10.
- [9] 吴小珊, 李崇涛, 曾柯寒, 等. 基于矩阵束的电力系统小干扰稳定性分析模型及其特征分析方法[J]. 南方电网技术, 2020, 14(7): 39 – 45. WU Xiaoshan, LI Chongtao, ZENG Kehan, et al. Small signal stability analysis model of power system and its eigen-analysis method based on matrix pencil[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 39 – 45.
- [10] ZHU J, HU J, WANG S, et al. Small-signal modeling and analysis of MMC under unbalanced grid conditions based on linear time-periodic (LTP) method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 205 – 214.
- [11] 孙丽玲, 胡兰青. 双馈风力发电机的调频策略及机组定子故障下的弱电网稳定性研究[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 509 – 516. SUN Liling, HU Lanqing. Frequency regulation strategy of DFIG-based wind power generating unit and stability research of weak grids considering DFIG stator fault[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 509 – 516.
- [12] GUAN L, YAO J, LIU R, et al. Small-signal stability analysis and enhanced control strategy for VSC system during weak-grid asymmetric faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2074 – 2085.
- [13] FANG X, YAO J, LIU R, et al. Small-signal stability analysis and current control reference optimization algorithm of DFIG-based WT during asymmetric grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7750 – 7768.
- [14] 陈嘉梁, 严正, 徐潇源, 等. 大规模新能源接入背景下小干扰稳定分析中状态矩阵特征值的灵敏度分析[J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 56 – 62. CHEN Jialiang, YAN Zheng, XU Xiaoyuan, et al. Sensitivity analysis of eigenvalue of status matrix in small-signal stability analysis considering large-scale renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 56 – 62.
- [15] 叶运铭, 汪娟娟, 陈威, 等. 基于小干扰动态模型的 LCC-HVDC 系统控制器参数优化方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(4): 1 – 9. YE Yunming, WANG Juanjuan, CHEN Wei, et al. Controller parameters optimization method for LCC-HVDC system based on small-interference dynamic model[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(4): 1 – 9.
- [16] LIN P, ZHANG C, ZHANG X, et al. Finite-time large signal stabilization for high power DC microgrids with exact offsetting of destabilizing effects[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4014 – 4026.
- [17] XIE W, HAN M, CAO W, et al. Virtual resistance tradeoff design for DCMG grid-forming converters considering static and large-signal dynamic constraints[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5582 – 5593.
- [18] HE J, ZHANG X, MA H, et al. Lyapunov-based large-signal control of three-phase stand-alone inverters with inherent dual control loops and load disturbance adaptivity[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8391 – 8401.
- [19] 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.
- [20] HE J, ZHANG X, MA H, et al. Lyapunov based large-signal control of three-phase stand-alone inverters with inherent dual control loops and load disturbance adaptivity[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8391 – 8401.
- [21] MING J, WANG Y, WANG F, et al. Large-signal stability analysis and shunt active damper compensation for DC microgrid with multiple constant power loads[C]. 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 11 – 14, August, 2019, Harbin, China.
- [22] ZHANG Yuanhui, ZHENG Huajun, ZHANG Chao, et al. T-S fuzzy model based large-signal stability analysis of DC microgrid with various loads[J]. IEEE Access, 2023(11): 88087 – 88098.
- [23] 张泽华, 宋桂英, 张晓璐, 等. 考虑恒功率负载的直流微电网稳定性与鲁棒性控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16):

- 4391–4405.
- ZHANG Zehua, SONG Guiying, ZHANG Xiaolu, et al. Stability and robust control strategy for DC microgrid considering constant power load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4391–4405.
- [24] 刘宿城, 李响, 秦强栋, 等. 直流微电网集群的大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3132–3147.
- LIU Sucheng, LI Xiang, QIN Qiangdong, et al. Large signal stability analysis of DC microgrid cluster [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3132–3147.
- [25] 厉泽坤, 孔力, 裴玮, 等. 基于混合势函数的下垂控制直流微电网大扰动稳定性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3725–3734.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei, et al. Large-disturbance stability analysis of droop-controlled DC microgrid based on mixed potential function [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3725–3734.
- [26] 刘欣博, 孙晓溪, 宋晓通. 带恒功率负载的交直流混合微电网系统大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 115–125.
- LIU Xinbo, SUN Xiaoxi, SONG Xiaotong. Large signal stability analysis of AC/DC hybrid microgrid system with constant power load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 115–125.
- [27] 张沈习, 王浩宇, 李然, 等. 考虑智能软开关接入的主动配电网扩展规划方法. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 48–60.
- ZHANG Shenxi, WANG Haoyu, LI Ran, et al. Active distribution network expansion planning method considering the integration of soft open point [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 48–60.
- [28] NADERI M, KHAYAT Y, SHAFIEE Q, et al. Interconnected autonomous ac microgrids via back-to-back converters—part II: stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11801–11812.
- [29] 魏承志, 李俊豪, 涂春鸣, 等. 计及变压器与SOP损耗特性的柔性互联配电网优化调控策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 69–78.
- WEI Chengzhi, LI Junhao, TU Chunming, et al. Optimal regulation and control strategy for flexible interconnected distribution network considering loss characteristics of transformers and soft open points [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 69–78.
- [30] 赵金利, 陈昊, 宋关羽, 等. 考虑可靠性收益的配电网智能软开关规划方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 22–31.
- ZHAO Jinli, CHEN Hao, SONG Guanyu, et al. Planning method of soft open point in distribution network considering reliability benefits [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 22–31.
- [31] 史金柱, 杨黎晖, 朱美婷. 弱电网下基于DSOGI-PLL的并网换流器频率耦合阻抗建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 112–117.
- SHI Jinzhu, YANG Lihui, ZHU Meiting. Frequency coupling impedance modeling and stability analysis of grid-connected converter based on DSOGI-PLL in weak grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 112–117.
- [32] 钱一涛, 赵晋斌, 马俊清, 等. 弱电网下基于对称PLL结构的并网逆变器频率耦合消除与稳定性增强方法[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3893–3901.
- QIAN Yitao, ZHAO Jinbin, MA Junqing, et al. Grid-connected inverter frequency coupling elimination and stability enhancement based on symmetrical PLL structure under weak grid [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3893–3901.
- [33] 万磊, 汤涌, 吴文传. 考虑锁相环动态的MMC-HVDC机电暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2566–2576.
- WAN Lei, TANG Yong, WU Wenchuan. An electromechanical transient model of MMC-HVDC considering PLL dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2566–2576.
- [34] 彭茂兰, 冯雷, 王宇, 等. 基于桥臂调制波调整的多端柔直系统直流过电压抑制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 171–181.
- PENG Maolan, FENG Lei, WANG Yu, et al. DC overvoltage suppression strategy for MMC-MTDC based on bridge arm modulated wave adjustment [J]. Electric Power, 2024, 57(4): 171–181.
- [35] GHEISARNEJAD M, FARISIZADEH H, KHOOBAN M H. A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC-DC power buck converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6849–6858.
- [36] ZOU Y, ZHANG L, QIN J, et al. Phase-unsynchronized power decoupling control of mmc based on feedback linearization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 2946–2958.

收稿日期: 2023-07-07; 网络首发日期: 2024-01-09

作者简介:

阙鹏(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网SOP系统大信号稳定性分析及控制策略, pen9kan@126.com;

郑华俊(1987), 男, 通信作者, 讲师, 硕士生导师, 博士, 研究方向为电力电子系统稳定性、电力系统建模与控制, hjzheng@gzu.edu.cn;

袁旭峰(1976), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用、电力电子化电力系统、配电网节能降耗, 17015676@qq.com。