

基于 RLC 阻抗网络的环形直流分布式电源系统 小扰动稳定性分析

罗世刚¹, 张伟¹, 贺悝², 刘毅楷³

(1. 国网甘肃省电力公司发展事业部, 兰州 730000; 2. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411100; 3. 湖北安源安全环保科技有限公司, 武汉 430000)

摘要: 由于光伏变流器、储能变流器和各种用电负荷的开关电源等电力电子设备的负电阻特性, 导致环形直流分布式电源系统 (distributed power system, DPS) 的小干扰稳定性面临着严峻的挑战, 而基于传统阻抗模型与状态空间模型在分析环形直流 DPS 时尚存在一定局限性。文中基于阻抗 (导纳) 网络的无源特性, 建立系统的 RLC (resistance inductance capacitance) 无源网络模型与具有相同开环稳定特性的负反馈系统, 从而将 RLC 阻抗网络模型应用于 DPS 稳定性预判与设计, 通过一个包含 6 变流器的直流 DPS 验证了文中所提方法的有效性。经过理论分析和实验结果验证, 该方法在系统稳定性判别与设计方面展现出了显著的优势。

关键词: 阻抗网络模型; 环形直流 DPS; 小扰动稳定性; 等价开环函数

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.09.019

中图分类号: TM93

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)09-0192-09

Small disturbance stability analysis of ring DC distributed power system based on RLC impedance network

Luo Shigang¹, Zhang Wei¹, He Li², Liu Yikai³

(1. Development Division, State Grid Gansu Provincial Electric Power Company, Lanzhou 730000, China.
2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411100, Hunan, China. 3. Hubei Anyuan
Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Due to the negative resistance characteristic of power electronic device such as photovoltaic converter, energy storage converter, and switching power supplies for various electrical loads, the small-signal stability in ring DC distributed power system (DPS) is facing challenge. However, the analysis methods based on traditional impedance model and state space model have some limitations when applied to stability analysis for DPS. The impedance network model and negative feedback system with a stable open-loop function of system are established based on the impedance (admittance) characteristics of the converter ports, then, the stability judgment and design for the DPS is applied by the impedance network model. Finally, the validity of the proposed method is verified by DC DPS with 6-infeed converters. The theoretical analysis and experimental result show that the proposed method has a good advantage in stability judgment and design for DPS.

Keywords: impedance network model, ring DC DPS, small disturbance stability, equivalent open-loop function

0 引言

目前, 直流分布式电源系统 (distributed power system, DPS) 被认为是获取可再生能源的有效途径而受到越来越多的关注^[1-2]。常被广泛应用于数据中心、电信基站、工业自动化、电动汽车充电站、直流智能电网、商业或民用直流建筑等^[3-5]。然而, 随

着 DPS 规模的持续增长, 由于并行子系统之间的相互作用, DPS 可能会出现稳定性问题或动态性能恶化。目前, DPS 系统稳定性问题主要分为大扰动和小扰动稳定性分析且以小扰动稳定性分析为主^[6-7]。基于阻抗的方法已被证明是分析直流和交流 DPS 中并行子系统间交互稳定性的有效方法^[8-9]。

在以往的文献中, 已经提出了各种理论来分析

基金项目: 国网甘肃省电力公司科技项目 (52272317000C)

一个 DPS 的两个并行子系统之间的交互稳定性,如传统的基于阻抗比的 Middlebrook 稳定性准则,定义了等效环路增益,提取了影响交互稳定性的关键因素,显著简化了级联 DPS 的稳定性分析^[10]。然而,该判据保守性较高,可能会导致更多的系统设计成本。为了降低其准则的保守性,文献[11]提出了禁止准则的概念,但不能分析逆变器与电网的交互稳定性。因此,文献[12-14]考虑了电流源和电压源之间的差异,并定义了单电压源-单电流源 DPS 中的等效回路增益。此外,文献[15]研究了 Z+Z 型双并联电压源系统的稳定性问题。此外,为了提高 DPS 的稳定性,文献[16-17]通过重塑每个源或负载的端口阻抗,提供了各种主动或被动阻尼方法。上述理论和方法为分析和提高由两个并行子系统组成的 DPS 的稳定性提供了坚实的基础。然而,随着 DPS 子系统数量和类型的增加,稳定性问题更加复杂。

新能源和储能等直流电源的发展和直流型负荷的快速增长,高比例新能源 DPS 成为电力系统的新型表现形式。在涉及功率控制源的 DPS 中,包含多个电压源子系统、多个功率控制源子系统、和多个负载子系统,其中子系统的数量和类型庞大,工作模式时变,相应的基于阻抗模型的稳定性理论还没有完全建立。文献[18]基于状态空间法分析多变流器 DPS 的稳定性问题,但其状态空间矩阵的高维特性,可能产生“维数灾”问题。文献[19-20]采用基于阻抗的方法来分析多个并联逆变器的稳定性,但结论仅在并网模式下得出。文献[21-22]将直流 DPS 的转换器分类为母线电压控制变换器(BVCC, bus voltage controlled converter)和母线电流控制变换器(BCCC, bus current controlled converter),并提出了与 DPS 的结构和工作模式无关的稳定性判据。然而,该判据并未考虑线路阻抗的影响。文献[23]提出了一种包含一个电压源子系统、多个功率控制源子系统和多个负荷子系统的直流 DPS 小信号稳定性的分散阻抗规范,其主要适用于单分布式电源与多荷系统,并未推广至多功率源多荷 DPS。文献[24]基于状态空间法对多换流器子系统间交互作用及参数影响进行了详细分析,但大规模变流器接入易导致“维数灾”问题。文献[25]根据直流微电网内部的多样性,建立了具有多个下垂控制源和负载的直流微电网模型。通过分析特征值分布、静态特性和分岔可确定系统稳定性与下

垂系数、线路阻抗、直流母线电容和负载等参数之间的定量关系。同时现有的研究成果主要集中在辐射网络结构直流 DPS 上。而环网形结构的鲜有研究^[26]。与辐射型结构相比,环形直流 DPS 具有显著的经济性和可靠性优势:环形 DPS 系统平均停电持续时间指标可减少 1/3,对敏感负荷的供电可靠性更优;可接纳的分布式电源穿透功率可增加 16%。但由于环形 DPS 各分布式电源之间连接更复杂,耦合更加紧密,其稳定性分析将更加复杂。

为了解决上述问题,在多变流器馈入的环形直流 DPS 系统中,计及线路 RLC(resistance inductance capacitance)对系统稳定性影响,通过推导其等效负反馈模型,提出一种基于 RLC 无源阻抗网络模型的开环传递函数分析方法来研究系统小扰动稳定性问题。首先,推导了 DPS 系统的等效负反馈等效电路,是稳定性设计的基础;然后建立了各接口变换器的阻抗模型,提出了一种等效的开环函数来简化分析系统稳定性。最后通过实验验证了所提方法在分析 DPS 稳定性具有较好的优势。

1 直流 DPS 的阻抗网络负反馈模型构建

1.1 环形直流 DPS 拓扑结构

文中主要讨论新能源多馈入条件下的环形直流 DPS 的小扰动稳定性问题,图 1 给出了环形直流 DPS 的典型结构。

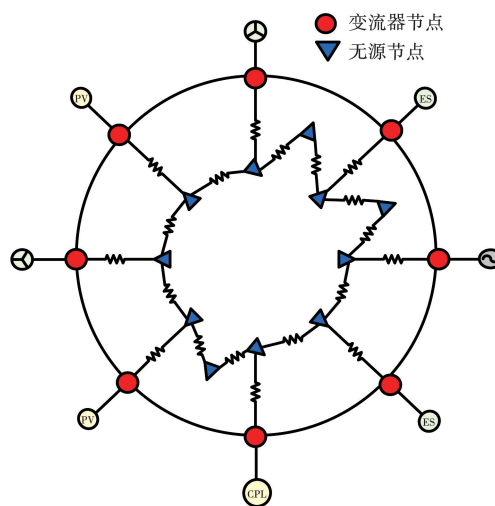


图 1 环形直流 DPS 典型结构

Fig. 1 A typical structure of ring DC DPS

从电力电子的视角出发,直流分布式电源系统(DPS)在实际应用中可以被视作一个由等效源、输电网络和负载系统所组成的复合体系。这一体系涵盖了直流电压控制单元、输电线路网络和功率控

制单元等多个关键组成部分。为了简化分析过程,我们可以将直流 DPS 中的直流电压控制单元等效为电池电压控制转换器(BVCC),功率控制单元等效为电池电流控制转换器(BCCC),而传输线路则可以等效为电阻-电感-电容(RLC)无源网络。这样的等效转换有助于我们更清晰地理解直流 DPS 的工作原理和性能特性。

其等效电路如图 2 所示,其中包括 m 个 BVCC 子系统, n 个 BCCC 子系统,无源阻抗环形网络包括电阻、电感和电容。定义所有源流出为正。

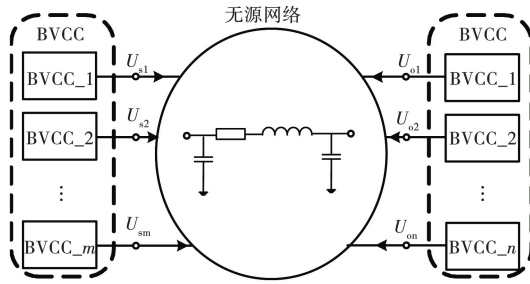


图 2 DPS 的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of the DPS

在线性化分析的过程中, BVCC 和 BCCC 分别视为戴维南及诺顿等效模型^[13], 其电压和电流满足如下方程式:

$$\begin{cases} u_s = u^* - Z_s \cdot i_s \\ i_0 = i^* - Y_0 \cdot u_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_s 为 BVCC 等效阻抗矩阵; Y_0 为 BCCC 等效导纳矩阵; u^* 为 BVCC 子系统的扰动电压源; i^* 为 BCCC 子系统的电流扰动源; u_s (i_s) 和 u_0 (i_0) 是 BVCC 子系统和 BCCC 子系统输出的电压与电流。BVCC 和 BCCC 子系统为阻抗网络输入及输出有源节点。

1.2 RLC 阻抗网络负反馈模型推导

根据上述定义, 则 BVCC 和 BCCC 子系统的电压电流关系也可表示为:

$$\begin{bmatrix} i_s \\ u_0 \end{bmatrix} = \tilde{r} + G \begin{bmatrix} u_s \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\tilde{r}$ 为系统等效扰动; G 为反混合参数矩阵; 则系统满足如下关系:

$$\begin{bmatrix} u_s \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* \\ i^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s & \\ & Y_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

结合式(2)和式(3), 并化简可得:

$$Y = (E + T)^{-1} X \quad (4)$$

式中: E 为 $(m+n)$ 阶单位矩阵, 其他变量见式(5)所示:

$$\begin{cases} Y = \begin{bmatrix} u_s \\ i_0 \end{bmatrix} \\ T = L \cdot G \\ L = \begin{bmatrix} Z_s & \\ & Y_0 \end{bmatrix} \\ X = \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{i} \end{bmatrix} - L * \tilde{r} \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)可得该系统的等效负反馈模型如图 3 所示。

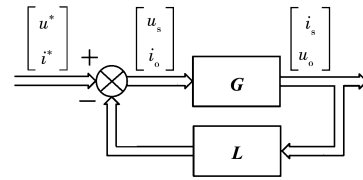


图 3 DPS 的等效负反馈模型

Fig. 3 Equivalent negative feedback model for DPS

故以 $F = L \cdot G$ 为开环函数的等效负反馈模型与图 3 系统有相同特征根, 表明系统稳定性一致。因此, 可以通过研究特征方程 $\det(I_{m+n} + F)$ 来分析系统的稳定性。RLC 阻抗网络负反馈模型将系统内不同模块分为 BVCC 和 BCCC 两类子系统, 大大简化分析难度, 且在建模时考虑传输电容及母线电容, 相较于文献[21]更符合工程实际。

2 接口变换器阻抗模型

2.1 光伏模块小信号建模

采用的光伏模块如图 4 所示。光伏电池经 Boost 变换器与直流母线相连, 采用基于 MPPT 的双环控制, 外环为基于扰动观测法 (perturbation & observation, P&O) 的功率控制环, 内环为电压环, 控制光伏电池端口电压 u_{pv} 跟随 P&O 输出电压 U_{pvm} 。由于外环的响应速度比内环缓慢许多, 在分析时可忽略外环特性^[15]。

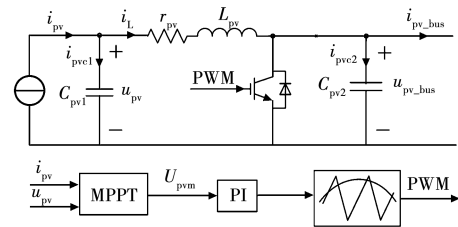


图 4 光伏模块控制策略

Fig. 4 Control strategy of photovoltaic module

光伏模块的数学模型可推导为:

$$\begin{cases} L_{pv} \frac{di_L}{dt} = u_{pv} - i_L * r_{pv} - (1-d) * u_{pv_bus} \\ C_{pv1} \frac{du_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \\ C_{pv2} \frac{du_{pv_bus}}{dt} = (1-d) * i_L - i_{pv_bus} \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_{pv} (i_{pv}) 为光伏电池输出电压 (电流); u_{pv_bus} (i_{pv_bus}) 为 Boost 变换器输出电压 (电流)。式中占空比 d 满足式 (7) 关系:

$$\begin{cases} d = (U_{pvm} - u_{pv}) G_{PI} \\ G_{PI} = \frac{s * k_{cp} + k_{ci}}{s} \end{cases} \quad (7)$$

式中: G_{PI} 为 PI 环节等效传递函数; k_{cp} 和 k_{ci} 为电压环 PI 环节的比例和积分系数; U_{pvm} 为 P&O 最大功率点电压。

对式 (6) 求拉普拉斯变换并结合式 (7) 化简, 则光伏模块等效输出导纳:

$$\begin{cases} Y_{pv} = s * C_{pv2} + \frac{s * (G_{PI} * I_L + G_{pv1} * G_{pv2}) * G_{pv2}}{G_{pv1} * G_{pv3} + s * (1 + G_{PI} * U_{pv_bus})} \\ G_{pv1} = s * C_{pv1} + \frac{I_{sc} * k_1}{U_{oc} * k_2} * e^{\frac{U_{pv_bus}}{U_{oc} * k_2}} \\ G_{pv2} = 1 - k_{ci} * \frac{U_{pv}}{U_{pv_bus}} \\ G_{pv3} = s^2 * L_{pv} + s * r_{pv} \end{cases} \quad (8)$$

其中大写变量为稳态值 (储能模块及恒功率负载模块皆满足该词条规则)。

2.2 储能模块小信号建模

储能模块如图 5 所示, 蓄电池经双向 DC/DC 变换器与直流母线相连, 采用电压控制模式来维持母线电压恒定, 为直流电压控制单元。

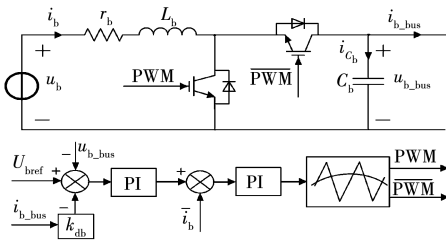


图 5 储能模块控制策略

Fig. 5 Control strategy of energy storage module

储能模块的数学模型可推导为:

$$\begin{cases} L_b \frac{di_L}{dt} = u_b - i_L * r_b - d * u_{b_bus} \\ C_b \frac{du_b}{dt} = d * u_b - i_{b_bus} \end{cases} \quad (9)$$

式中占空比 d 满足式 (10) 关系:

$$\begin{cases} d = \left[(U_{bref} - u_{b_bus} - i_{b_bus} * k_{db}) * B_{Plu} - i_b \right] * B_{Pli} \\ B_{Plu} = \frac{s * k_{cpu} + k_{ciu}}{s} \\ B_{Pli} = \frac{s * k_{cpi} + k_{cii}}{s} \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_{db} 为下垂系数; B_{Plu} 为电压环 PI 环节等效传递函数; k_{cpu} 和 k_{ciu} 为电压环 PI 环节的比例和积分系数; B_{Pli} 为电流环 PI 环节等效传递函数; k_{cpi} 和 k_{cii} 为电流环 PI 环节比例和积分系数; U_{bref} 为电压环参考电压。

同理, 储能模块等效输出阻抗为:

$$\begin{cases} Z_b = -\frac{G_3 * G_1 + B_{Pli} * (k * k_{db} * B_{Plu} + D_b) * G_2}{k * G_1 + k * B_{Plu} * B_{Pli}} \\ G_1 = k + B_{Pli} * (s * C_b * U_{b_bus} + D_b * I_L) \\ G_2 = G_3 * I_L - D_b * U_{b_bus} \\ G_3 = s * L_b + r_b \\ k = s^2 * C_b * L_b + s * C_b * r_b + D_b^2 \end{cases} \quad (11)$$

2.3 恒功率负载模块小信号建模

本文研究的恒功率负载模块如图 6 所示, 恒阻抗负载经 Buck 变换器与直流母线相连。

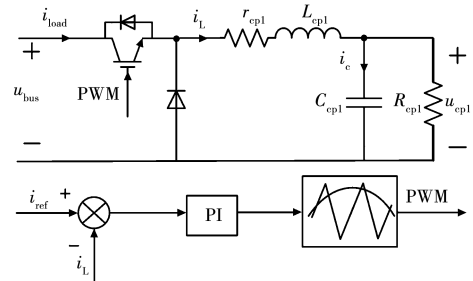


图 6 恒功率负载控制策略

Fig. 6 Control strategy of constant power load

恒功率负载模块的数学模型可推导为:

$$\begin{cases} L_{cpl} \frac{di_L}{dt} = -r_{cpl} * i_L + d * u_{bus} - u_{cpl} \\ C_{cpl} \frac{du_{cpl}}{dt} = i_L - \frac{1}{R_{cpl}} * u_{cpl} \end{cases} \quad (12)$$

其中占空比 d 满足式 (13) 关系:

$$\begin{cases} d = (U_{ref} - u_{cpl}) * C_{PI} \\ C_{PI} = \frac{s * k_{cp} + k_{ci}}{s} \end{cases} \quad (13)$$

式中: C_{PI} 为 PI 控环节等效传递函数; k_{cp} 和 k_{ci} 为电流环 PI 环节比例和积分系数; i_{ref} 为电流环参考电压。

同理,恒功率负载模块等效输出导纳见式(14):

$$\begin{cases} Y_{\text{cpl}} = \frac{D_{\text{cpl}}^2 * G_1}{R_{\text{cpl}} * (1 + U_{\text{bus}} * C_{\text{pl}}) + G_1 * G_2} \\ G_1 = s * C_{\text{cpl}} * R_{\text{cpl}} + 1 \\ G_2 = s * L_{\text{cpl}} + r_{\text{cpl}} \end{cases} \quad (14)$$

3 直流 DPS 的稳定性分析

3.1 基于阻抗网络模型的稳定性判据

环形直流 DPS 的稳定性由 F 来评估。由于无源阻抗网络只包含电阻、电感和电容,因此 G 既不包含任何 RHP(right half plane)极点,也不包含任何 RHP 零点。此外,假设所有变流器在独立运行时都是稳定的。因此, L 也不包含任何 RHP 极点。可利用基于系统小环增益的(广义)奈奎斯特图(GNC)或 bode 图分析系统稳定性。

但由于求解特征方程特征根或者使用 GNC 都比较复杂。针对此问题,并能适用于频域内分析,本文提出一个与其等价的开环函数,如式(15)所示:

$$H(s) = \det(I + F) - 1 \quad (15)$$

在频域内,式(15)等价开环函数可表征一个以 1 为前向通路, $H(s)$ 为系统的负反馈通路,显然该系统的特征方程与图 3 所示系统的特征方程为同一个。其次注意到 $H(s)$ 的极点与阻抗网络矩阵 F 的极点相同,故这个等价 SISO 系统的开环极点实部小于等于零。

因此,基于阻抗测量和 $H(s)$,可通过 F 确定的 $H(s)$ 是否包围 $(-1, 0)$ 点来评估环形直流 DPS 的稳定性。

上述判据本质都是分析系统特征根,但求解特征根需要分解的矩阵阶数远远大于另两种,且还需要获得特征方程的解析表达式,故其算法复杂度要更高。而广义奈奎斯特判据主要优势是针对高阶的多输入输出系统。本文判据属于 SISO 系统奈奎斯特判据,复杂度低且其形式相对简洁,方便进行直观的裕度设计,如表 1 所示。

表 1 不同判据对比分析

Tab. 1 Comparative analysis of different criterions

判据	计算方法	矩阵维数	解析表达式
求解特征根 ^[5,18]	QR 分解	高	需要
广义奈奎斯特 ^[8,14]	QR 分解	低	不需要
本文所提等价开环函数	LU 分解	低	不需要

3.2 直流 DPS 稳定性分析流程

由 $F = L \cdot G$ 可知,相比于分析整个系统稳定

性,设计其中的各子系统 BVCC(BCCC)的稳定性显然更为简单,故基于所提的无源阻抗模型与判稳方法,将直流 DPS 的稳定性设计总结为一标准化流程,为系统参数设计提供理论支撑。其主要过程如图 7 所示。

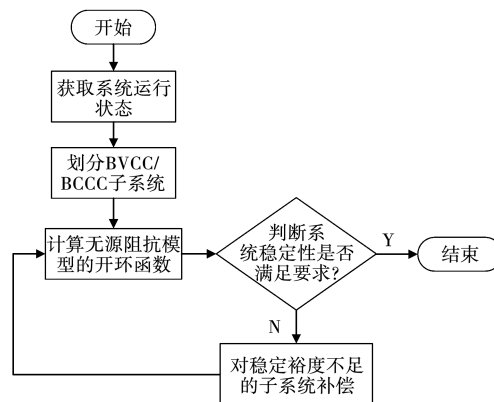


图 7 直流 DPS 的稳定性设计流程

Fig. 7 Stability design process of a DPS

在上述流程中,首先需要将子系统按照文中所提进行分类为 BVCC、BCCC 及无源网络子系统,计算 L 和 G ,进而利用本文所提阻抗网络模型的开环函数来分析系统的稳定性。

4 算例研究

为验证上述对环形直流 DPS 的稳定性判定方法的正确性,在此部分建立的系统如图 8 所示,其中端口 3(4)相连接的是光伏的 Boost 变换器,为母线电流控制单元;端口 5(6)为恒功率负载端口,考虑恒功率负荷和电阻负载,为母线电流控制单元;端口 1(2)相连接的是储能双向 DC/DC 变换器,为直流母线电压控制模块。每组模块与直流母线间传输线路为 π 型等值线路。通过上述分类可获得系统的阻抗网络模型为:

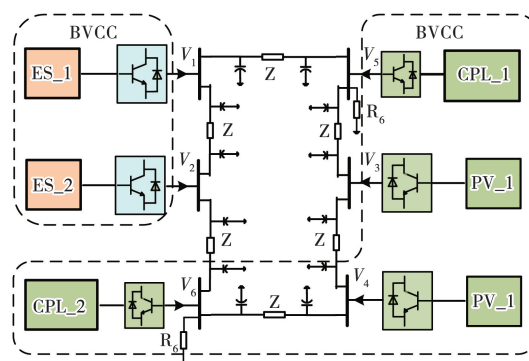


图 8 直流 DPS 算例结构图

Fig. 8 Structural diagram of a DC DPS

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} Z_{b1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{b2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{pv1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{pv2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{cpl1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{cpl2} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{G} \quad (16)$$

根据电网络理论^[20]可知,系统导纳节点方程矩

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 2Y + Y_{pv1} - \frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & -Y & -\frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & 0 & -\frac{Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & 0 \\ -Y & 2Y + Y_{pv2} - \frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} & 0 & -\frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} & 0 & -\frac{Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} \\ -\frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & 0 & 2Y + Y_{cpl1} - \frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & -Y & -\frac{Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & 0 \\ 0 & -\frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} & -Y & 2Y + Y_{pv2} - \frac{Y \cdot Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} & 0 & -\frac{Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} \\ \frac{Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & 0 & \frac{Y}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & 0 & \frac{1}{2Y + 1/Z_{b1} + 1/R_5} & 0 \\ 0 & \frac{Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} & 0 & \frac{Y}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} & 0 & \frac{1}{2Y + 1/Z_{b2} + 1/R_6} \end{bmatrix}$$

式中: Y 为输电线路导纳; Y_{pv1} 、 Y_{pv2} 、 Y_{cpl1} 、 Y_{cpl2} 分别为 BCCC 等效输出导纳, Z_{b1} 、 Z_{b2} 分别为 BVCC 等效输出阻抗。

所研究的 DPS 系统在表 2 ~ 表 5 参数下能够稳定运行,设定该工况为标况。

表 2 储能接口变换器相关参数

Tab. 2 Related parameters of energy storage interface converter

参数描述	数值/单位	参数描述	数值/单位
k_{cpu}	0.3	k_{db}	0.45
k_{ciu}	18	L_b	5.5 mH
k_{cpi}	2.4	r_b	2.4 Ω
k_{cii}	18	C_b	220 μF

表 3 光伏接口变换器相关参数

Tab. 3 Related parameters of PV interface converter

参数描述	数值/单位	参数描述	数值/单位
k_{cp}	4.6	L_{pv}	3 mH
k_{ci}	24	C_{pv1}	4.7 μF
r_{pv}	0.1 Ω	C_{pv2}	2 200 μF

表 4 负载接口变换器相关参数

Tab. 4 Related parameters of load interface converter

参数描述	数值/单位	参数描述	数值/单位
k_{cp}	9.5	r_{cpl}	0.3 Ω
k_{ci}	3	C_{cpl}	47 μF
u_{cpl}	110 V	R_{cpl}	12 Ω
L_{cpl}	6 mH		

阵为:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = \mathbf{G} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 $\mathbf{G}$ 为:

表 5 传输线路 RLC 的参数

Tab. 5 Transmission line RLC parameters

参数描述	数值/单位	参数描述	数值/单位
r	0.2 Ω	c	1 μF
l	0.3 mH	/	/

为了验证模型的正确性及有效性,建立了基于 RT-LAB 系统的硬件在环实验平台,采用型号为 DSPTMS32F28335 的主控器件,并使用示波器对实验波形进行观测,如图 9 所示。

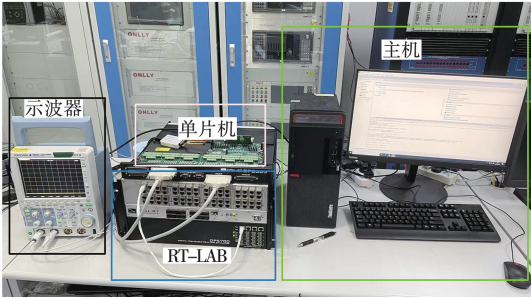


图 9 RT-LAB 硬件在环实验平台

Fig. 9 RT-LAB hardware in the loop experimental platform

4.1 光伏波动影响分析

所用光伏电池型号为 TB EA4180T,光伏面板由该类型电池串联 4 块并联 20 块。光伏模块采用 P&O 算法跟踪最大功率点,假设光伏模块工作在标况 25 $^{\circ}\text{C}$ 。现设定如下三种工况:

工况 1: $S_{PV} = 800 \text{ W/m}^2$, $P_{PV} = 10 \text{ kW}$ 。
工况 2: $S_{PV} = 1\,000 \text{ W/m}^2$, $P_{PV} = 16 \text{ kW}$ 。
工况 3: $S_{PV} = 1\,200 \text{ W/m}^2$, $P_{PV} = 20 \text{ kW}$ 。

分别绘制上述三种工况下 Nyquist 轨迹如图 10 所示。

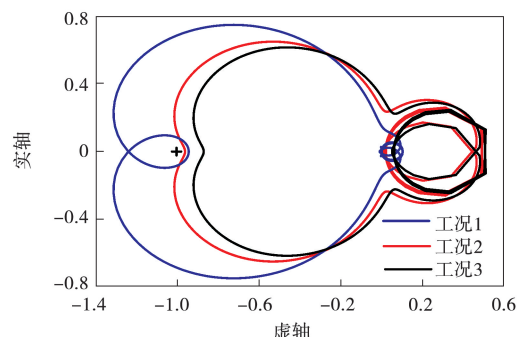


图 10 光照强度对 DPS 系统稳定性影响

Fig. 10 Influence of illumination intensity on the stability of DPS

通过图 10 可知,在频域中,系统在光照强度为 $1\,000 \text{ W/m}^2$ 的条件下, Nyquist 曲线不包围 $(-1, j0)$ 点,系统稳定,当光照强度变为 $1\,200 \text{ W/m}^2$ 时, Nyquist 曲线离 $(-1, j0)$ 点距离变大,系统稳定裕度提高,当光照强度变为 800 W/m^2 时, Nyquist 曲线包围 $(-1, j0)$ 点,系统失稳。

在环实验结果如图 11 所示, t_1 时刻,光照强度由 $1\,000 \text{ W/m}^2$ 增加至 $1\,200 \text{ W/m}^2$,母线电压瞬时值上升,随后稳定于 400 V ,其光照强度的增加导致光伏功率增大,系统稳定裕度提高,母线电压振荡幅度明显减小; t_2 时刻,光照强度由 $1\,200 \text{ W/m}^2$ 降低至 800 W/m^2 ,母线电压瞬时值下跌,随后稳定于 400 V ,其光照强度的减弱导致光伏功率减小,母线电压振荡失稳,与频域结果一致。

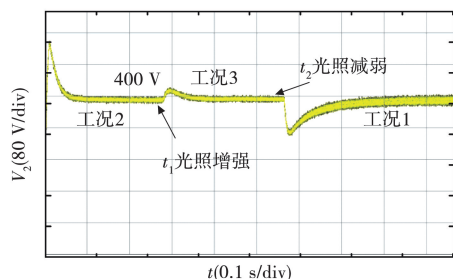


图 11 光照强度变化下的实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms under varying light intensity

本部分算例讨论恒功率负荷和线路阻抗变化时,对 RDCM 稳定性的影响,以此验证本文所提稳定性判定方法的有效性。

4.2 负载功率变化对 DPS 稳定性影响分析

考虑负载功率变化的影响,设置系统运行于不同工况,其对应的功率如表 6 所示。

表 6 不同工况负载功率变化

Tab. 6 Load power variation under different working conditions

模式	P_{CPL}/kW	R_{CPL}/Ω
工况 A	8	4.3
工况 B	20	7.5

图 12 为负荷功率变化时, DPS 的 Nyquist 轨迹曲线。初始运行于工况 A 下, CPL 功率 $P_{CPL} = 8.0 \text{ kW}$, 电阻负载数值为 4.3Ω , 此时电阻负载功率占主导, 系统稳定。

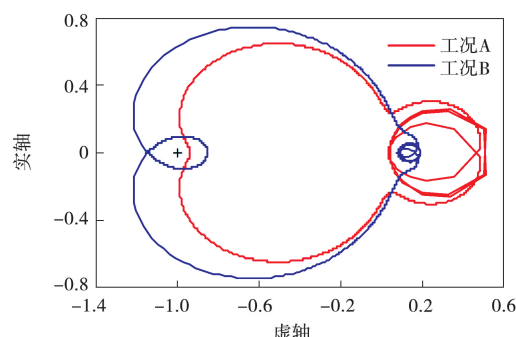


图 12 负荷功率变化时 RDCM 的稳定性分析结果

Fig. 12 Analysis results of stability of RDCM varying with load power

在 $t = 0.5 \text{ s}$ 时,切换至工况 B, CPL 功率占主导,此时 Nyquist 轨迹包围临界点 $(-1, j0)$,表明系统处于不稳定状态,如图 12 所示。因此,系统由工况 A 到工况 B,存在失稳风险。

其实验结果如图 13 所示。当运行于工况 A 时,系统能稳定运行。在 t 时刻切换至工况 B 时,由于 CPL 功率占主导,负电阻特性加强,对变换器输出电压稳定性产生影响,从而造成系统不稳定,该结果与如图 12 中频域分析结果一致。

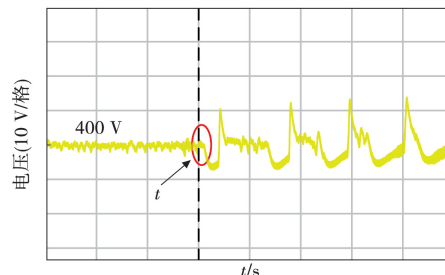


图 13 负载功率变化下 V_5 电压波形

Fig. 13 Voltage waveform of V_5 under load power variation

4.3 线路阻抗对 DSP 稳定性的影响分析

图 14 为线路阻抗变化时, DPS 的 Nyquist 轨迹和负载电压 V_s 的瞬时值波形。线路阻抗初始参数 $R=0.01\ \Omega$, $L=10^{-3}\text{ mH}$, 系统稳定。由图 14 可知, 在 $t=0.5\text{ s}$ 时, 线路电阻参数变为 $R=0.006\ \Omega$, 此时, Nyquist 轨迹在复平面内呈现出向左偏移的趋势, 这暗示着系统面临着更高的不稳定风险, 并且其稳定裕度正在逐渐降低。当 $R=0.02\ \Omega$ 时, DPS 的 Nyquist 轨迹在复平面中存在右移趋势, 因此增大线路阻抗可以提高系统的稳定性。

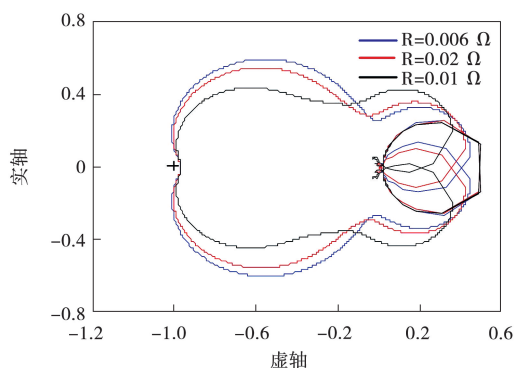


图 14 不同线路阻抗下 DPS 的稳定性分析结果

Fig. 14 Analysis results of stability of DPS under different line impedances

对应的实验结果如图 15 所示, 改变线路阻抗, 在 t_1 时刻, 线路电阻参数变为 $R=0.006\ \Omega$, V_s 电压产生振荡。在 t_2 时刻, 线路电阻参数变为 $R=0.02\ \Omega$, V_s 电压又恢复到稳定值, 比初始状态电压波动振幅减小。结果表明实验结果与上述频域分析结果一致。

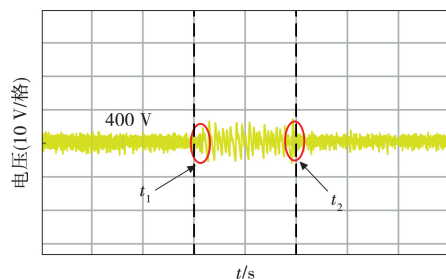


图 15 不同线路阻抗下 V_s 电压波形图

Fig. 15 V_s voltage waveform under different line impedances

5 结论

文章致力于研究环形直流 DPS 拓扑结构, 通过引入基于 RLC 阻抗网络模型的开环传递函数分析方法, 深入探讨了系统在小扰动下的稳定性问题。现将所得结论整理如下:

1) 针对环形直流分布式电源系统拓扑结构, 文中首次将其划分为 BVCC 子系统、BCCC 子系统和无源子系统。在此基础上, 提出了 RLC 阻抗网络模型的概念, 并推导出了与其等效的负反馈模型。这一创新性的方法有助于简化分析复杂直流分布式电源系统的稳定性问题, 为接下来的研究和应用提供了重要的理论基础;

2) 为避免使用广义奈奎斯特判稳, 文章进一步提出了相应的等价开环函数与稳定性设计流程。通过频域分析和实验表明, 所提等价开环函数与设计流程能较好地判别与设计系统的稳定性;

3) 根据所提等价开环函数判据稳定设计流程, 该方法同样可推广于多变流器直流微电网系统和双母线直流微电网级联系统, 具有一定的普适性。

参考文献

- [1] 薛士敏, 刘存甲, 李蒸, 等. 基于控保协同的环形直流微电网单端测距保护技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 122-129.
Xue Shimin, Liu Cunjia, Li Zheng, et al. Single-end ranging protection technology for ring DC microgrid based on coordinated control and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 122-129.
- [2] 崔茗莉, 冯天天, 刘利利. 双碳目标下区块链与可再生能源的融合发展研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 17-24.
Cui Mingli, Feng Tiantian, Liu Lili. Integration and Development of Blockchain and Renewable Energy under Double Carbon Target[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 17-24.
- [3] 郭力, 冯泽彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-936.
Guo Li, Feng Yibin, Li Xialin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-936.
- [4] 张美霞, 王晓晴, 杨秀, 等. 考虑路网和用户满意度的集群电动汽车主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 1-11.
Zhang Meixia, Wang Xiaoping, Yang Xiu, et al. Stackelberg game optimization scheduling strategy for aggregated electric vehicles considering customer satisfaction and the road network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 1-11.
- [5] 张林, 赖向平, 彭皓月, 等. 智能电网框架下电动汽车智能充电系统设计研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 78-82, 118.
Zhang Lin, Lai Xiangping, Peng Haoyue, et al. Research on the design of intelligent charging system for electric vehicles under the framework of smart grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 78-82, 118.
- [6] Gui Y, Han R, Guerrero J M, et al. Large-signal stability improvement of DC-DC converters in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2534-2544.

- [7] 张博智, 张茹, 焦东翔, 等. 基于VMD-SAST的电能质量扰动分类识别方法[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 34-40.
Zhang Bozhi, Zhang Ru, Jiao Dongxiang, et al. Power quality disturbance identification method based on VMD-SAST[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 34-40.
- [8] 张辉, 杜明桥, 孙凯, 等. 双母线直流微电网的级联稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 34-42.
Zhang Hui, Du Mingqiao, Sun Kai, et al. Cascade stability analysis of double-bus DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 34-42.
- [9] 王德全, 王汝凡, 邱军, 等. 混合式直流断路器内部关键参数对电弧电流转移特性的影响研究[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 193-200.
Wang Dequan, Wang Rufan, Qiu Jun, et al. research on influence of key parameters in hybrid DC circuit breakers on arc current commutation characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 193-200.
- [10] Middlebrook R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators[J]. Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting, 1976(1): 366-382.
- [11] Wildrick C M, Lee F C, Cho B H, et al. A method of defining the load impedance specification for a stable distributed power system[J]. IEEE Trans. Power Electron, 1995, 1(10): 280-285.
- [12] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [13] 阎对丰, 刘平, 冯伦, 等. 基于两电平电压源合成试验方法的混合式直流断路器开断过程仿真研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 76-83, 91.
Yan Duifeng, Liu Ping, Feng Lun, et al. Research on interruption process simulation of hybrid DC circuit breaker based on two-level voltage source synthetic test method [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 76-83, 91.
- [14] 支娜, 张辉, 肖曦, 等. 分布式控制的直流微电网系统级稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 368-378.
Zhi Na, Zhang Hui, Xiao Xi, et al. System-level stability analysis of DC microgrid with distributed control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 368-378.
- [15] Zhang C, Molinas M, Rygg A, et al. Impedance-based analysis of interconnected power electronics systems; impedance network modeling and comparative studies of stability criteria[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2520-2533.
- [16] Plesnick S, Singh P. A new impedance-based relative stability criterion for DC power systems[C]//2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), Tempe, AZ, USA, 2021: 1-6.
- [17] 殷涵, 宣羿, 黄怡, 等. 基于虚拟阻抗的低压配电网拓扑识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 83-93.
Yin Han, Xuan Yi, Huang Yi, et al. Virtual impedance-based low-voltage distribution network topology identification method[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 83-93.
- [18] 朱晓荣, 韩丹慧. 基于虚拟惯性控制的直流微电网稳定性分析及其改进方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 121-127.
Zhu Xiaorong, Han Danhui. Stability analysis of DC microgrid based on virtual inertia control and its improved method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 121-127.
- [19] Agorreta J L, Borrega M, López J, et al. Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2011, 26(3): 770-785.
- [20] 杨哈露, 马海啸, 蒋天健, 等. 一种带飞跨电容的单相光伏逆变器[J]. 电源技术, 2024, 48(1): 156-160.
Yang Hanlu, Mahaixiao, Jiang Tianjian, et al. A single phase PV inverter with flying capacitor[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(1): 156-160.
- [21] 周宇超, 屈克庆. 基于改进阻抗分析法的多变流器直流微电网稳定性[J]. 现代电力, 2023, 40(6): 1052-1059.
Zhou Yuchao, Qu Keqing. Research on the Stability of Multi-converter DC Microgrid Based on Improved Impedance Analysis Method[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(6): 1052-1059.
- [22] 张泉瑞, 赵欣博, 蒋硕, 等. 卫星BCDR模块双向LLC谐振变换器拓扑研究[J]. 电源技术, 2024, 48(3): 477-483.
Zhang Xiaorui, Zhao Xinbo, Jiang Shuo, et al. Research on topology of bidirectional LLC resonant converter for satellite BCDR module[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(3): 477-483.
- [23] Wang X M, Peng Y G, Zhu J, et al. Decentralized impedance specifications for small-signal stability of DC distributed power systems[J]. IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electronics, 2017, 5(4): 1578-1588.
- [24] 朱晓荣, 李铮. 多换流器直流微电网稳定性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1400-1410.
Zhu Xiaorong, Li Zheng. Stability analysis of multi converter DC microgrid[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1400-1410.
- [25] Liu H, Guo W, Cheng D, et al. Stability and bifurcation analysis of DC microgrid with multiple droop control sources and loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2361-2372.
- [26] Yang L, Zhang Q, Liu S, et al. Impedance-Based Small-Signal Stability Analysis of DC Microgrid Clusters[C]//2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). IEEE, 2022: 1579-1584.

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-08-06

作者简介:

罗世刚(1977—),男,高级工程师,研究方向为电力系统、电力市场。E-mail:xbjg@sina.com

张伟(1982—),男,高级工程师,研究方向为电力系统。

贺铿(1991—),男,通信作者,博士,副教授,研究方向为储能高效利用、新能源电力系统分析与控制。

E-mail: jay.duan@163.com

刘毅楷(1997—),男,硕士,工程师,研究方向为电网规划、电力系统。

(编辑 杜景飞)