# 直流微网谐振模态分析及有源阻尼抑制方法

林 刚<sup>1</sup>,李 勇<sup>1</sup>,王姿雅<sup>1</sup>,曹一家<sup>1</sup>,刘嘉彦<sup>1</sup>,王鹏程<sup>1</sup>,樊 芮<sup>2,3</sup>,杨倩雅<sup>4</sup> (1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;

2. 国网湖南省电力有限公司供电服务中心(计量中心),湖南 长沙 410004;

3. 智能电气测量与应用技术湖南省重点实验室,湖南 长沙 410004;

4. 国网湖南省电力有限公司检修公司,湖南 长沙 410000)

摘要:谐振可能引起直流微网的谐波不稳定,是导致电压崩溃的潜在原因。利用频域分析法确定直流微网的 谐振频率需要建立复杂的高阶传递函数,且不能提供谐振影响范围等信息。提出了分布式控制下直流微网 的谐振模态分析方法,通过分析系统的节点导纳矩阵确定系统的谐振频率,并利用频域分析验证该方法的有 效性;根据参与因子确定谐振的影响范围,进一步地研究了线路参数对系统模式和谐振频率的影响;提出了 有源阻尼抑制方法,通过在电流内环注入阻尼信号降低线路调节变流器(LRC)输出阻抗的谐振峰值,提高系 统的稳定性;基于 PSCAD/EMTDC 平台对所提分析方法和有源阻尼控制进行仿真验证。

关键词:直流微网;模态分析;谐振;有源阻尼;线路调节变流器 中图分类号:TM 727 
文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.018

# 0 引言

直流微网由于其具有结构与控制简单、能量转 换效率高等优势成为分布式电源的主要接入对象, 受到越来越多的关注。然而,要进一步利用直流系 统还面临各种技术上的挑战,谐振问题及其抑制策 略就是需重点研究的内容。大量的文献针对谐振问 题<sup>[1-17]</sup>及抑制方法<sup>[6-12]</sup>进行了研究并提出了稳定判 据,普遍认为恒功率负载(CPL)的负阻抗特性是引 起直流系统谐振的主要原因,但可能存在其他影响 因素,故仍需进一步地研究谐振问题。

针对直流微网的谐振稳定性问题,国内外学者 开展了大量研究。文献[1]给出了一种基于直流微 网节点阻抗特性的稳定性分析方法。文献[2]提出 了一种基于阻抗的主从控制下直流微网的稳定性判 据,并给出了一种基于双准比例谐振控制器的有源 阻尼控制方法。文献[3]利用小信号模型揭示了系 统参数对稳定性的影响规律,提出了基于虚拟阻抗 的稳定器以增强直流系统的阻尼。文献[4]通过分 析系统的传递函数研究单母线和多母线系统的谐振 机理,并提出了一种振荡阻尼控制方法。文献[5-7] 根据阻抗匹配准则研究了直流系统中的高频、低频 谐振,并解释其产生原因及部分影响因素的影响规 律。文献[10]将特征值问题转化为二次特征值问

#### 收稿日期:2018-05-19;修回日期:2019-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51822702);湖南省 重点研发计划项目(2018CK2031);长沙市杰出青年创新项 目(KQ1707003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51822702), the Key Research and Development Program of Hunan Province(2018GK2031) and the Excellent Innovation Youth Program of Changsha(KQ1707003) 题,通过分析雅可比矩阵的特征值确定系统的稳定 性,并根据变换器的运行模式提出了2种稳定方法。 以上文献集中研究阻抗建模、谐振机理分析及抑制 策略等方面。综合而言,目前谐振研究方法主要有 基于阻抗或传递函数的频域分析法和基于小信号模 型的时域分析方法。利用频域分析法确定谐振频率 需建立复杂的高阶传递函数,计算量大,且不能提供 谐振影响范围等信息;利用时域分析方法也不能提 供全面的谐振信息。文献[14]利用模态法分析系 统的谐振频率,克服了频域法的诸多缺点,为解决谐 振问题提供了新思路。在此基础上,本文提出直流 微网的谐振模态分析方法,通过系统的节点导纳矩 阵确定谐振频率,根据参与因子确定谐振中心及其 影响范围。

为提高系统的谐振稳定性,谐振抑制成为直流 应用的另一个重要的研究内容,有源阻尼控制因不 会带来额外的功率损耗而受到重视,主要通过引入 虚拟阻抗<sup>[3]</sup>或阻抗重塑的方法抑制谐振。文献[9] 通过阻抗重塑改变变换器的端口特性,消除低频段 谐振通路抑制谐振;文献[10]在控制环中引入扰动 变量的负前馈信号阻尼谐振零点的变化。根据文献 [5-9]中谐振机理的分析结果,本文提出一种有源阻 尼控制器,通过在电流内环注入阻尼信号降低线路 调节变流器(LRC)输出阻抗的谐振峰值,消除与 CPL输入阻抗交越的风险抑制谐振。最后利用 PSCAD/EMTDC软件对理论分析结果和所提抑制方 法进行验证。

## 1 模态分析理论

## 1.1 模态分析法的概念

在模态分析法中,对于一个多节点的系统,并联

谐振问题往往与节点导纳矩阵 **Y** 中各元素的极小值 有关<sup>[14]</sup>。根据电路中的节点网络分析法,可得到频 率为*f* 时系统的节点导纳方程为:

$$\boldsymbol{V}_f = \boldsymbol{Y}_f^{-1} \boldsymbol{I}_f \tag{1}$$

其中, $Y_f$ 为频率f下系统的节点导纳矩阵; $V_f$ 、 $I_f$ 分别为频率f下系统的节点电压和节点注入电流矩阵。

在分析某个节点的频率响应时,通常 $I_f$ 只有 1 个注入量,其他元素为 0。当 Y 趋近于奇异时, $Y^{-1}$ 中出现极大值(在 Y 中则表现为某一特征值趋于 0),系统中某些节点电压会产生极大值,引起严重的 并联谐振问题<sup>[14-15]</sup>。利用特征根分析(其本质为矩 阵解耦技术)可以研究  $Y_f$  的奇异性。

将节点导纳矩阵  $Y_f$  分解为以下的形式:

$$Y_f = LAT \tag{2}$$

其中, $\Lambda$ 为对角特征值矩阵, $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m, \dots)$ ;L、T分别为左、右特征向量矩阵且互为逆阵。则式(1)可表示为:

$$TV_f = \Lambda^{-1} TI_f \tag{3}$$

定义  $U_f = TV_f(V_f = LU_f)$  为频率 f 下系统模态电 压向量,  $J_f = TI_f$  为频率 f 下系统模态电流向量。T的值可以用来作为判断节点电流能在多大程度上激 励起模态谐振的依据,反映可激性特点; L 的值可以 用来表述系统模态电压对实际电压的贡献,反映可 观性特点。

式(3)可改写成式(4)和(5),特征值倒数的单位与阻抗一致,故定义特征值倒数的矩阵为系统模态阻抗矩阵 **Z**<sub>f</sub>。

$$\boldsymbol{U}_{f} = \boldsymbol{\Lambda}^{-1} \boldsymbol{J}_{f} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{f1} \\ \boldsymbol{U}_{f2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{U}_{fn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{f1}^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\lambda}_{f2}^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \boldsymbol{\lambda}_{fn}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_{f1} \\ \boldsymbol{J}_{f2} \\ \vdots \\ \boldsymbol{J}_{fn} \end{bmatrix} = \boldsymbol{Z}_{f} \boldsymbol{J}_{f} \quad (5)$$

其中,n为系统中的节点数。

根据式(5),模态电压和模态电流在模态域中 可实现解耦。当 $\lambda_{fm}=0$ 或者非常小时,则很小的模态 m 注入电流  $J_{fm}$ 将导致很大的模态 m 电压  $U_{fm}$ ,而 其他模态电压将不受影响。即在模态域中谐振对应 某个特定的模态,可根据特征值的大小识别出谐振 "位置"<sup>[14-15]</sup>。此外,可使用回路阻抗矩阵分析串联 谐振问题。

## 1.2 参与因子(节点敏感度指标)

假设谐振发生在模态 1 的频率处,此时,模态 1 处的模态阻抗  $Z_1$  远远大于其他模态的模态阻抗  $Z_m$  $(m \neq 1)$ ,即  $Z_m \approx 0 (m \neq 1)$ 是可行的。根据式(4)和 (5)可得式(6)。其中矩阵 **S**将可激性指标 **T**和可 观性指标 L 结合为敏感度矩阵,从而得到节点参与 因子 $f_{PFi}$ <sup>[15]</sup>。定义 $f_{PFi} = L_{im}T_{mi}$ ,其中i为母线编号,m为模态号。

$$V_{f} \approx L_{f} \begin{bmatrix} \lambda_{f1}^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} T_{f} I_{f} = \lambda_{f1}^{-1} \begin{bmatrix} L_{11}T_{11} & L_{11}T_{12} & \cdots & L_{11}T_{1n} \\ L_{21}T_{11} & L_{21}T_{12} & \cdots & L_{21}T_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{n1}T_{11} & L_{n1}T_{12} & \cdots & L_{n1}T_{1n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \\ \vdots \\ I_{fn} \end{bmatrix} = \lambda_{f1}^{-1} SI_{f}$$
(6)

参与因子 f<sub>PFi</sub>表征了系统中每个节点对该次谐振的参与程度,其大小表示该谐振在节点处是否容易激发、是否容易观测。谐振模态分析中,参与因子的幅值反映了谐振能够传播的距离,具有最大参与因子的节点可以被认为是谐振的中心。

# 2 直流微网阻抗/导纳模型

图 1 为直流微网结构图。图中, R<sub>Lij</sub>和 L<sub>Lij</sub>分别 为线路的电阻和电感; C<sub>eq</sub>为直流母线电容。系统元 件参数见附录中表 A1, 控制系统参数见附录中表 A2。LRC采用双向直流变换器通过分布式控制对 电源电压进行变换, 当存在电压扰动时维持母线电 压稳定。负载点变换器采用 Buck 电路向电阻供电, 将母线电压变换为负载需要的电压, 模拟 CPL。



图 1 且加限网知构

Fig.1 Structure of DC microgrid

LRC 采用电流电压双环控制和 V-I 下垂控制, 其控制框图如图 2 所示。图中, $G_{i,i}(s)$ 、 $G_{u,i}(s)$ 分别 为电流、电压控制器,且  $G_{u,i}(s) = k_p + k_i / s; R_{droopi}$ 为下 垂系数。



图 2 LRC 控制框图 Fig.2 Control block diagram of LRC

下垂控制增加了 LRC 的输出阻抗,使其不能等 效为一个理想的电压源。因此,采用下垂控制的 LRC 可以等效为一个可控的电流源,如图 3(a)所 示。图中 $L_{L}$ 和 $R_{L}$ 分别为线路电感和电阻。电流内 环控制器可等效为一阶延时环节 $G_{\text{boost}} = 1/(1+sT_i)$ , 为提高系统的抗干扰能力,将时间常数 $T_i$ 设置为 1.5倍的系统开关周期,本文中开关频率为 10 kHz。



#### 图 3 LRC 等效简化电路

Fig.3 Simplified equivalent circuit of LRC

根据图 3(a)可以得到小信号传递函数  $H_{s1}(s)$ 、  $H_{s2}(s)和 H_{s3}(s)$ ,它们分别为输出电流  $\Delta i_s$ 、参考电 压  $\Delta u_{dc_{ref}}$ 和线路电流  $\Delta i_{out}$ 与输出电压  $\Delta u_{out}$ 之间的 传递函数。

$$H_{\rm s1}(s) = \frac{\Delta u_{\rm out}}{\Delta i_s} = \frac{R_{\rm load}}{sC_sR_{\rm load} + 1} \tag{7}$$

$$H_{s2}(s) = \frac{\Delta u_{out}}{\Delta u_{dc ref}} = \frac{G_u(s) G_{boost}(s)}{sG_s + G_u(s) G_{boost}(s)}$$
(8)

$$H_{s3}(s) = \frac{\Delta u_{out}}{\Delta i_{out}} = \frac{-(R_{droop}G_u(s)G_{boost}(s)+1)}{G_u(s)G_{boost}(s)+sC_s}$$
(9)

其中, $R_{\text{load}}$ 为等效负荷, 且 $R_{\text{load}}$ =45  $\Omega$ ;式(9)中负号 表示输出电流的增加会导致输出电压的降低。由式 (9)可知, LRC 的输出阻抗可表示为:

$$Z_{\rm seq}(s) = \frac{1}{Y_{\rm seq}} = -\frac{\Delta u_{\rm out}}{\Delta i_{\rm out}} = Z_{\rm so} //\frac{1}{sC_{\rm s}} = -H_{\rm d3} \quad (10)$$

进一步地可将 LRC 等效为 s 域内的简化模型, 将等效电路转化为诺顿等效电路或戴维南等效电路,分别如图 3(b)和图 3(c)所示。

同理可得 CPL 的等效简化电路,如图 4 所示。 图中, $G_{lu}(s)$ 、 $G_{buck}(s)$ 分别为电压环控制器和延时环 节; $u_{lo}$ 、 $u_{lde_ref}$ 、 $i_1$ 分别为 Buck 电路输出电压、参考电 压和等效输入电流源。

由图 4(a) 可得, 输入电流  $\Delta i_1$  与输入电压  $\Delta u_{in}$ 之间的传递函数, 如式(11) 所示; 参考电压  $\Delta u_{ldc_{ref}}$ 与输入电压  $\Delta u_{in}$ 之间的传递函数, 如式(12) 所示。



图 4 CPL 等效简化电路

Fig.4 Simplified equivalent circuit of CPL

$$G_{1}(s) = \frac{\Delta u_{\rm in}}{\Delta i_{\rm l}} = \frac{-s^{2}(1+T_{\rm i}s)^{2}}{s^{3}C_{\rm CPL}(1+T_{\rm i}s)^{2} - R_{\rm de}(k_{\rm lp}s+k_{\rm li})^{2}} \quad (11)$$

$$G_{2}(s) = \frac{\Delta u_{\rm in}}{\Delta u_{\rm ldc\_ref}} = \frac{s(1+T_{\rm i}s)(k_{\rm lp}s+k_{\rm li})}{s^{3}C_{\rm CPL}(1+T_{\rm i}s)^{2} - R_{\rm dc}(k_{\rm lp}s+k_{\rm li})^{2}}$$
(12)

其中, $R_{dc}$ 为 Buck 电路输出侧电阻。此外,根据图 4 和  $G_2(s)$ , CPL 的输入导纳可表示为:

$$Y_{\rm eq}(s) = \frac{i_{\rm CPL}}{u_{\rm in}} = sC_{\rm CPL} + \frac{1}{G_1(s)}$$
(13)

## 3 直流微网谐振模态分析

#### 3.1 直流微网谐振模态分析及其频域验证

根据以上分析建立如图 5 所示的等效电路,系 统包含 5 个节点,其节点导纳矩阵  $Y_1$  如式(14)所示。  $Y_1 =$ 

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{e}} + \sum_{i=2}^{5} \frac{1}{Z_{Li1}} & -\frac{1}{Z_{L21}} & -\frac{1}{Z_{L31}} & -\frac{1}{Z_{L41}} & -\frac{1}{Z_{L51}} \\ -\frac{1}{Z_{121}} & \frac{1}{Z_{121}} + Y_{seq1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{Z_{131}} & 0 & \frac{1}{Z_{131}} + Y_{seq2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{Z_{L41}} & 0 & 0 & \frac{1}{Z_{L41}} + Y_{eq1} & 0 \\ -\frac{1}{Z_{L51}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Z_{L51}} + Y_{eq2} \end{bmatrix}$$

$$(14)$$

$$\begin{cases} Z_{\rm Li1} = sL_{\rm Li1} + R_{\rm Li1} & i = 2, 3, \cdots, 5 \\ Z_{\rm c} = 1/(sC_{\rm eq}) \end{cases}$$
(15)



# 图 5 直流微网等效电路



振频率,分别为 10.3 Hz 和 13.3 Hz。为验证分析结 果的正确性,分析传递函数  $H_{s1}(s)$ 、 $H_{s2}(s)$ 、 $H_{s3}(s)$ 、  $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 的频率响应,如图 6(b)所示。可见系统 存在 2 个谐振频率,分别为 65.2 rad/s 和 84.3 rad/s;  $G_1(s)$ 存在谐振带,同样会带来谐振风险。与模态分 析的结果一致,验证了模态分析法的正确性。



Fig.6 Comparison between modal analysis and frequency-domain response results

由式(7)一(9)和式(11)、(12)可知,通过分析 传递函数确定系统谐振频率时,随着系统复杂程度 的增加,传递函数将变得高阶复杂,而且需要对各个 传递函数进行分析才能得到系统中所有的谐振频 率。但采用模态分析法更加简便,计算量更小,获得 的谐振信息更加全面。当系统采用主从控制时,可 建立其等效电路获得阻抗/导纳模型,亦可得到相应 控制下的谐振分析方法。

表1为各谐振频率下各节点的参与因子,能定 性地反映谐振时各节点电压的畸变程度和谐振的影 响范围。以10.3 Hz为例,有3个模态的谐振频率为 10.3 Hz,节点2、节点3和节点5的参与因子大于其 他节点,因此,它们对谐振的可观性和可激性均高于

表1 相同线路参数下的参与因子

Table 1 Participation factors with same line parameters

枯太	谐振频	参与因子				
快心	率/Hz	节点1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5
2	13.5	0.101 1	0.224 7	0.224 7	0.224 7	0.224 7
3	10.3	0	0.733 3	0.059 8	0.047 9	0.159 0
4	10.3	0	0.016 3	0.051 4	0.396 4	0.535 9
5	10.3	0	0.000 36	0.638 9	0.305 6	0.055 2

其他节点,为该频率下的谐振中心。虽然节点1的参与因子为0,但是其可观测指标并不为0,所以节点1处依然存在10.3 Hz的电压纹波。详细的可观性指标和可激性指标分别见附录中表A3和A4。

#### 3.2 线路电感对谐振的影响

图 7(a)为线路 2 电感从 0.1 mH 变化到 10 mH 时系统的模态分析图。可见随着线路电感的增大, 模态 1 的谐振频率降低;模态 4、5 的谐振频率不受 线路 2 电感  $L_{121}$ 的影响。图 7(b)为线路电感  $L_{121}$  = 3 mH时的模态分析结果。此时系统存在 3 个模态, 谐振频率分别为 10.3 Hz、12.2 Hz 和 19.2 Hz。各个 节点的参与因子如表 2 所示。系统谐振时,5 个节 点的电压均受到不同程度的影响,造成节点电压波 形的畸变。



## 图 7 不同线路电感 L<sub>121</sub>下的模态分析

Fig.7 Modal analysis under different values of  $L_{121}$ 

表 2 L<sub>121</sub> = 3 mH 时的参与因子

Table 2 Participation factors when  $L_{121} = 3 \text{ mH}$ 

		1			621		
齿太	谐振频	参与因子					
快心	率/Hz	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	
1	12.2	0.037 2	0.268 4	0.157 7	0.268 4	0.268 4	
1	19.2	0.043 1	0.008 6	0.931 1	0.008 6	0.008 6	
4	10.3	0	0.560 7	$3.4 \times 10^{-32}$	0.191 7	0.227 1	
5	10.3	0	0.033 1	$1.9 \times 10^{-33}$	0.473 8	0.420 8	

此外,根据 3.1 节的分析,本文中存在 3 个模态 谐振频率为 10.3 Hz,从图 7(a)和表 2 中数据可知, 参数 L<sub>121</sub>对模态 1 的影响较大,而未影响模态 4、5, 它们的谐振频率没有随着 L<sub>121</sub>变化,说明仅改变某 一个元件参数并不能够影响所有的模态。因此,在 L<sub>121</sub>变化时系统中始终存在 10.3 Hz 这一频率的 谐振。

#### 3.3 线路电阻对谐振的影响

图 8 为线路 1 和 2 的电阻 *R*<sub>121</sub> 和 *R*<sub>131</sub> 从 0.1 Ω 变化到 1.5 Ω 时的系统模态分析图。可见随着电阻

的增加,模式2模态阻抗的峰值逐渐降低,起到了削 弱谐振影响的作用,而模态1没有受到影响,说明 该电阻与模态2相关性更强;可通过改变其他元件 参数的方法抑制模态1的谐振。这种通过改变网 络元件参数来削弱谐振的方法改变了系统的潮流 分布,而且带来额外的功率损耗。为提高系统的谐 振稳定性,本文将提出一种抑制谐振的有源阻尼 方法。



Fig.8 Modal analysis under different values of line resistance

# 4 有源阻尼抑制方法

## 4.1 阻尼方法的比较

抑制谐振的阻尼方法主要分为有源阻尼和无源 阻尼方法。无源阻尼方法通常将一个电阻与电容串 联或与电感并联,通过无源元件改变网络的等效阻 抗,提高系统的阻尼能力,如图 9(a)所示。该方法 虽然可以抑制谐振,但是改变了系统的潮流分布,而 且流经 *R*<sub>d</sub> 的电流带了来额外的功率损耗,降低了系 统的效率。





无源阻尼方法下系统的 Bode 图如图 10 所示。 可见随着阻尼电阻 *R*<sub>d</sub> 的减小,谐振峰值明显降低, 有效阻尼了系统的谐波谐振;然而,在阻尼谐振时其 高频增益逐渐升高,可能带来高频段附近的谐波放 大或谐振,谐振抑制不彻底。

为了克服以上无源阻尼的缺点,本文提出了一 种有源阻尼方法,如图 9(b)所示,通过虚拟的阻尼 电阻 R<sub>vd</sub>代替实际的阻尼电阻。虚拟的有源阻尼具 有无源阻尼谐振抑制能力,因为没有在实际电路中 添加物理电阻,所以不会带来额外的功率损耗。在



图 10 无源阻尼方法下系统的 Bode 图

Fig.10 Bode diagram of system under passive damping method 阻尼谐振时保持其高频增益不变,不会引起高频段 附近的谐振。

## 4.2 有源阻尼控制的实现

根据文献[5-10]的分析结果,电源侧输出阻抗 和负载侧输入阻抗间的匹配关系影响了系统的谐振 稳定性,因此本文根据图9(b)中有源阻尼的原理提 出一种针对LRC的有源阻尼控制方法,抑制LRC输 出阻抗的谐振峰值。为实现所提的谐振抑制策略, 对LRC的控制方法进行修改,其控制框图如图11 所示。将虚拟的受控源u<sub>de</sub>和虚拟阻尼电阻 R<sub>vd</sub>结合 引入控制电路中,其思想是利用控制算法的作用,提 高系统的阻尼能力,又能避免电阻带来的损耗,其本 质与并联虚拟电阻类似。



#### 图 11 有源阻尼控制框图

Fig.11 Control block diagram of active damping

通过式(16)计算虚拟阻尼电流信号  $i_{vd}$ ,并将其 注入电流内环;通过比例系数  $k = u_s/u_{out}$ 实现 LRC 输 出电流与输入电流间的换算。为消除高频谐波的影 响,在阻尼信号环节加入一个低通滤波器(LPF)。 此时,电压外环为内环提供一个虚拟的电流指令  $i'_{ins}$ , 主要包括电源电流  $i_{LS}$ 和  $i_{vd}$ 。当因外界扰动(如负载 变化、系统故障)激发电压谐振时,阻尼控制器产生 相应的阻尼电流信号提供虚拟阻尼,改善电压动态 响应。该方法未在实际的物理系统中加入额外的无 源阻尼支路(受控源  $u_{de}$ 和阻尼电阻  $R_d$ ),不会影响 系统的潮流分布; $i'_{ins}$ 中包含了必要的电源电流成分  $i_{LS}$ ,不会降低 LRC 的输出能力。

$$i_{\rm vd} = \frac{u_{\rm out} - u_{\rm dc}}{R_{\rm vd}} \tag{16}$$

图 12 为 LRC 输出阻抗 Z<sub>seq</sub>(s)的频率响应。有 源阻尼控制有效抑制了 LRC 输出阻抗的谐振峰值, 降低了与 CPL 输入阻抗交越的概率,提高了系统的 谐振稳定性。同时不影响其高频段响应,不会带来 高频段的谐振风险和额外的功率损耗。



Fig.12 Bode diagram of system under active damping control

#### 5 仿真验证

为验证所提分析方法和有源阻尼控制的有效性,根据附录中表 A1 和表 A2 中所示的数据,基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建直流微网仿真模型。

图 13(a)为相同线路参数下各节点电压的频 谱。可见系统谐振造成5个节点电压中9 Hz 和 12 Hz 附近的谐波有不同程度的放大。此外,参与因子的大 小可定性地反映节点电压的畸变程度和谐振的影响 范围。以 12 Hz 电压谐波为例,节点 1—5 电压的纹 波幅值分别为 6.758、6.858、6.857、6.818 V,节 点 1 的纹波幅值小于其他 4 个节点,与表 1 中参与 因子的分析结果相吻合。图 13(b)为 *L*<sub>121</sub>=3 mH 时 各个节点电压的频谱,此时系统中共存在 3 个模态, 其频率分别约为 9 Hz、13 Hz 和 19 Hz。仿真结果与 第 3 节理论分析具有一致性,证明了谐振模态分析 法的正确性。



Fig.13 Fourier analysis results

为验证所提有源阻尼方法的有效性,在t=3 s 和t=5 s 时,分别向直流系统注入一个负载扰动。 CPL<sub>1</sub>和CPL<sub>2</sub>的功率分别在t=3 s 和t=5 s 时增加 1.5 kW,仿真结果如图 14 所示。可见在该控制器的 作用下,激励的电压谐振和线路 1、2 的功率振荡过 程被很好地抑制,而且电压纹波更小。表明系统的 阻尼得到了提高,证明该补偿器的有效性。



# 6 结论

直流微网是强耦合的高阶复杂系统,有效地确 定谐振频率以及谐振的影响范围对于解决谐振问题 至关重要。本文建立直流微网的节点导纳矩阵,利 用模态分析法对并联谐振问题进行了研究,并提出 一种有源阻尼抑制方法。通过仿真验证了所提方法 和有源阻尼补偿器的有效性,得到结论如下:

a. 提出了直流微网并联谐振模态分析法,其无 需建立复杂的传递函数便可确定系统的谐振频率, 并可获得谐振中心和影响范围等全面的谐振信息, 适用于多并联、多级联和环型结构的复杂系统; b. 部分模态下的谐振频率随着线路电感的增加而减小,增大线路电阻不会增加谐振模式,且有削弱谐振影响的作用;

**c.** 提出针对 LRC 的有源阻尼方法,在不影响潮流分布、系统效率和 LRC 输出能力的前提下,通过抑制 LRC 输出阻抗谐振峰值提高系统的谐振稳定性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1]刘晓东,胡勇,方炜,等. 直流微电网节点阻抗特性与系统稳定 性分析[J]. 电网技术,2015,39(12):3463-3469.
   LIU Xiaodong,HU Yong,FANG Wei, et al. Analysis of node impedance characteristics and stability in DC microgrid [J]. Power System Technology,2015,39(12):3463-3469.
- [2] 胡辉勇,王晓明,于森,等. 主从控制下直流微电网稳定性分析 及有源阻尼控制方法[J]. 电网技术,2017,41(8):2664-2673.
  HU Huiyong, WANG Xiaoming, YU Miao, et al. Stability analysis and active damping control for master-slave controlled DC microgrid [J]. Power System Technology,2017,41(8):2664-2673.
- [3]郭力,冯怿彬,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] LIU Y, RAZA A, ROUZBEHI K, et al. Dynamic resonance analysis and oscillation damping of multiterminal DC grids[J]. IEEE Access, 2017,5:16974-16984.
- [5] RASHIDIRAD N, HAMZEH M, SHESHYEKANI K, et al. High-frequency oscillations and their leading causes in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4):1479-1491.
- [6] RASHIDIRAD N, HAMZEH M, SHESHYEKANI K, et al. A simplified equivalent model for the analysis of low-frequency stability of multi-bus DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):6170-6182.
- [7] RASHIDIRAD N, HAMZEH M, SHESHYEKANI K, et al. An effective method for low-frequency oscillations damping in multibus DC microgrids[J]. IEEE Journal on Emerging & Selected Topics in Circuits & Systems, 2017, 7(3):403-412.
- [8]林刚,李勇,王姿雅,等. 低压直流配电系统谐振机理分析与有 源抑制方法[J]. 电网技术,2017,41(10):3358-3364.
   LIN Gang,LI Yong, WANG Ziya, et al. Resonance mechanism analysis and its active damping suppression of LVDC distribution system[J]. Power System Technology,2017,41(10):3358-3364.
- [9] YE Q, MO R, LI H. Low-frequency resonance suppression of a dualactive-bridge DC/DC converter enabled DC microgrid [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3):982-994.
- [10] SU M, LIU Z, SUN Y, et al. Stability analysis and stabilization methods of DC Microgrid with multiple parallel-connected DC-DC converters loaded by CPLs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(1):132-142.
- [11] SULLIGOI G, BOSICH D, GIADROSSI G, et al. Multiconverter medium voltage DC power systems on ships: constant-power loads instability solution using linearization via state feedback control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5):2543-2552.
- [12] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. Stability enhancement based

on virtual impedance for DC microgrids with constant power loads [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 6(6): 2770-2783.

- [13] MO R, YE Q, LI H. DC impedance modeling and stability analysis of modular multilevel converter for MVDC application [C] // Energy Conversion Congress and Exposition. Cincinnati, Ohio, USA: IEEE, 2017:1-5.
- [14] 刘洋,帅智康,李杨,等. 多逆变器并网系统谐波谐振模态分析
  [J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):4156-4164.
  LIU Yang,SHUAI Zhikang,LI Yang, et al. Harmonic resonance modal analysis of multi-inverter grid-connected systems [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(14):4156-4164.
- [15] 方刚,杨勇,卢进军,等. 三相光伏并网逆变器电网高阻抗谐振抑制方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):109-116.
   FANG Gang, YANG Yong, LU Jinjun, et al. Resonance suppression method of high impedance power grid for three-phase photovoltaic grid-connected inverters [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):109-116.
- [16] 肖华锋,许津铭,谢少军. LCL 型进网滤波器的有源阻尼技术分析与比较[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):55-59.
   XIAO Huafeng,XU Jinming,XIE Shaojun. Analysis and comparison of active damping technologies for LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,35(5):55-59.
- [17] 雷一,赵争鸣,鲁思兆. LCL 滤波的光伏并网逆变器有源阻尼与 无源阻尼混合控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):23-27.
   LEI Yi,ZHAO Zhengming,LU Sizhao. Hybrid control of active and passive damping for grid-connected PV invert with LCL filter[J].
   Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):23-27.

#### 作者简介:



林 刚(1994—),男,山东诸城人,硕 士研究生,主要研究方向为电力电子在电 力系统中的应用(E-mail:lingang@hnu.edu. cn);

李 勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为 能源/电力系统优化运行与控制、电能变换

系统与装备等(E-mail:liyong1881@163.com);

王姿雅(1976—),女,湖南长沙人,讲师,博士,主要研究 方向为电力系统(E-mail;wangziya@126.com);

曹一家(1976—),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力市场与信息技术(IT)、复杂系统的智能控制(E-mail:yjcao@hnu.edu.cn);

刘嘉彦(1994—),男,湖南常德人,硕士研究生,主要研 究方向为配电网电压稳定(**E-mail**:jyliuco@163.com);

王鹏程(1994—),男,河南许昌人,硕士研究生,主要研 究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail:pcwang1994@ 163.com);

樊 芮(1992—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研 究方向为电力系统及其自动化;

杨倩雅(1994—), 女, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要研 究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail: 332814748@ qq.com)。

(下转第132页 continued on page 132)

#### Fault diagnosis of power dispatching based on alarm signal text mining

WANG Cuiyang<sup>1</sup>, JIANG Quanyuan<sup>1</sup>, TANG Yajie<sup>1</sup>, ZHU Bingquan<sup>2</sup>, XIANG Zhongming<sup>2</sup>, TANG Jian<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China;

3. State Grid Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 310009, China)

**Abstract**: The power dispatching system receives massive alarm signals during the failure process of power system, and the failure range may expand if the dispatcher cannot make a decision in a short time, so a fault diagnosis method of power dispatching based on alarm signal text mining is proposed, which includes two stages of alarm signal text preprocessing and fault diagnosis. In the first stage, an ontology dictionary is constructed by segmenting the text of alarm signals based on HMM(Hidden Markov Model) and removing the stop words, and VSM(Vector Space Model) is adopted for text vectorization. In the second stage, the sliding time window is used to read the real-time alarm signals, and a two-layer algorithm is proposed. In the first layer, SVM (Support Vector Machine) is adopted to classify the alarm signals in the sliding window, if the classification result justified to be a fault, the *k*-means clustering method in the second layer is used to extract faults with higher possibility to dispatcher for reference. A practical alarm signal in a power dispatching system is taken as an example to verify the feasibility of the proposed method. **Key words**; power dispatching; text mining; vector space model; support vector machine; *k*-means clustering

**Key words**: power dispatching; text mining; vector space model; support vector machine; *k*-means clustering

(上接第 125 页 continued from page 125)

#### Resonance modal analysis and active damping suppression method for DC microgrid

LIN Gang<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, WANG Ziya<sup>1</sup>, CAO Yijia<sup>1</sup>, LIU Jiayan<sup>1</sup>,

WANG Pengcheng<sup>1</sup>, FAN Rui<sup>2,3</sup>, YANG Qianya<sup>4</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Power Supply Service Center (Metrology Center), Changsha 410004, China;

3. Hunan Province Key Laboratory of Intelligent Electrical Measurement and Application Technology, Changsha 410004, China;

4. State Grid Hunan Electric Power Maintenance Company, Changsha 410000, China)

**Abstract**: Resonance could cause harmonic instability in DC microgrid, and represents a potential cause of voltage collapse. To determine the resonance frequency of DC microgrid, the traditional frequency domain analysis requires the establishment of complicated high-order transfer function and cannot provide the information such as influence range of resonance. A resonance modal analysis method of DC microgrid under distributed control is proposed, and the resonance frequency of the system is obtained by analyzing its node admittance matrix. The effectiveness of the method is verified using the frequency domain analysis. The influence range of the resonance can be determined according to the participation factors. Besides, the influence of line parameters on system mode and resonance frequency is analyzed. Furthermore, an active damping controller is proposed, which reduces the resonance peak value of LRC(Line Regulating Converter) output impedance by injecting damping signal into the inner current loop, and improves the stability of system. Finally, the proposed method and the active damping control are verified by simulative results on PSCAD/EMTDC.

Key words: DC microgrid; modal analysis; resonance; active damping; line regulating converter

附	录
---	---

	- <b>J</b>	
子系统	参数名称	数值
	输入电压 <i>u<sub>si</sub></i>	100 V
LDC	滤波电感 R <sub>si</sub> , L <sub>si</sub>	$0.1 \ \Omega/5 \ \mathrm{mH}$
LKC	输出电容 Csi	1000 uF
	下垂系数 R <sub>droopi</sub>	0.01/0.03
	负载电压 u <sub>dci</sub>	100 V
	各栽古玄 D (D)	4 kW
CDI	贝轼切罕 $\Gamma_i(\Lambda_i)$	4 kW
CPL	输入电容 CCPLi	1000 uF
	滤波电感 Li	5 mH
	输出电容 CLi	1000 uF
	直流母线电压 udc_bus	300 V
直流母线	线路阻抗 R <sub>Lil</sub> /L <sub>Lil</sub>	$0.1 \ \Omega/8 \ \mathrm{mH}$
	直流母线电容 Cea	2000 uF

## 表 A1 直流微网系统参数 Table A1 System parameters of DC microgrid

## 表 A2 直流微网控制参数 Table A2 Control parameters of DC microgrid

	-	0
控制器	比例系数(P)	积分系数(I)
LRC 电流内环 G <sub>i_i</sub> (s)	5	0.01
LRC 电压外环 $G_{u_i}(s)$	0.002	1.4
CPL 电流内环 G <sub>Li</sub> (s)	100	0.001
CPL 电压外环 GLu(s)	1.4	1.8

# 表 A3 可激性指标 Table A3 Excitability index

			v		
快心	节点 1	节点 2	节点3	节点 4	节点 5
3	0	0.1495	0.6893	0.6659	0.2430
4	0	0.1278	0.2267	0.6296	0.7320
5	0	0.0190	0.7993	0.5528	0.2348

## 表 A4 可观性指标 Table A4 Observables index

世大			特征向量1	- -	
侠心	节点1	节点 2	节点3	节点 4	节点 5
3	0.3523	0.8563	0.2445	0.2189	0.3987
4	0.3523	0.1278	0.2267	0.62;96	0.7320
5	0.3523	0.0190	0.7993	0.5528	0.2348