

基于综合附加阻尼的直流配电系统稳定性提升方法

王琳, 彭克, 刘磊, 陈羽, 焦提操, 路茂增

(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:直流配电网的数学建模是分析其稳定性的理论基础,对于分析系统的运行特性具有重大意义。基于典型 $P-U_{dc}$ 下垂控制的直流配电系统,建立了以动态导纳为基础的下垂控制小扰动稳定性分析模型,分析了直流线路电阻、电感参数变化对系统稳定性的影响。利用奈奎斯特判据对系统输出导纳与输入导纳之比进行分析,以评估系统的整体稳定性。提出了基于复合补偿的综合附加阻尼直流配电系统稳定性提升控制策略,对比分析了补偿前、后系统的稳定性,通过仿真软件搭建直流配电系统模型并进行时域仿真,理论分析和仿真结果均表明所提方法可以增强系统阻尼,抑制系统振荡。

关键词:直流配电系统;阻尼补偿;下垂控制;奈奎斯特判据;稳定性分析

中图分类号:TM 712;TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003024

0 引言

近年来,随着光伏发电、电动汽车等直流型源荷的发展以及用户对电能质量需求的不断提高,直流配电网日渐受到关注^[1-3]。相较于交流配电网,直流配电网可以更为灵活地接纳直流分布式电源与负荷,减少了中间的整流逆变环节;同时直流配电网还具有线损小、快速隔离交直流故障以及无需相频控制等优势^[4-5]。下垂控制作为直流配电网的典型控制策略,其弱阻尼特性逐渐显现,直流配电网的稳定性问题得到了广泛关注。

如何提高直流配电网的稳定性成为当前的研究点。文献[6]分析了直流配电网中换流器采用下垂控制策略时存在的不稳定问题,提出了一种基于小扰动约束的直流配电网下垂控制优化方法。文献[7]对于含有储能单元的直流配电网采用线性状态空间方程对换流器进行小信号建模,分析了系统主特征值以及换流器的闭环增益,提出了一种自适应控制器增益分段优化方法。文献[8]针对控制延时导致虚拟阻抗控制策略失效的问题,提出了一种基于虚拟阻抗角补偿的换流器振荡抑制方法,并进一步通过根轨迹法确定了虚拟阻抗的取值范围。文献[9]依据交流母线频率和直流母线电压确定微电网的功率需求,提出了一种换流器的双向下垂控制方法。文献[10]为维持直流配电系统不同工况下的电压稳定,提出了一种自动电压控制协调方案,并对直流电压误差控制和下垂控制进行综合优化。文献

[11]针对直流微电网电压抗干扰能力弱的问题,提出了一种基于一阶惯性环节的微电网虚拟惯量控制。文献[12]在分析系统阻尼的基础上,研究了负荷模型和不同运行方式对小扰动稳定性的影响,并给出了系统阻尼特性和频率特性变化的规律。文献[13]通过特征值分析了系统振荡与负荷类型、下垂系数以及线路参数之间的关系,揭示了低阻尼LC电路致使系统阻尼减少,进而造成系统高频振荡的现象,提出了一种频率相关的虚拟阻抗方法。

从上述分析可知,目前的研究主要针对直流微电网以及直流配电网下垂控制存在的弱阻尼情况,而有关直流配电线路对系统稳定性带来的影响及稳定性提升方法的研究较少。针对这一问题,本文建立了基于动态导纳的小扰动分析模型,并通过奈奎斯特判据分析直流线路参数值变化对系统稳定性的影响。提出了基于复合补偿的综合附加阻尼策略以提升系统稳定性,最后通过时域仿真结果验证了所提方法的有效性。

1 直流配电系统小扰动模型

多端直流配电系统的拓扑结构可以分为放射式、两端和多端3种供电结构类型。本文以放射式供电结构为例建立其小扰动模型,整体框图见附录中图A1,其包含交流系统、电压源型换流器、DC/DC斩波器、直流线路和直流负荷等。

1.1 换流器下垂控制小扰动稳定性模型

基于电压源型换流器建立下垂控制小扰动稳定性动态导纳模型。基于 $dq0$ 旋转坐标系下换流器的电压和电流动态特性如式(1)~(4)所示。

$$U_d - U_{od} = I_d(R_f + sL_f) - \omega L_f I_q \quad (1)$$

$$U_q - U_{oq} = I_q(R_f + sL_f) + \omega L_f I_d \quad (2)$$

$$I_d - I_{od} = sC_f U_{od} - \omega C_f U_{oq} \quad (3)$$

收稿日期:2019-08-10;修回日期:2020-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807112);山东省自然科学基金资助项目(ZR2017LEE022)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807112) and the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2017LEE022)

$$I_q - I_{oq} = sC_f U_{oq} + \omega C_f U_{od} \quad (4)$$

其中, U_d 、 U_q 和 I_d 、 I_q 分别为换流器输出的交流电压和电流的 d 、 q 轴分量; U_{od} 、 U_{oq} 和 I_{od} 、 I_{oq} 分别为交流母线电压和注入电流的 d 、 q 轴分量; R_f 、 C_f 、 L_f 分别为每相线路的电阻、电容和电感; ω 为交流电压角频率; s 为拉普拉斯算子。

$dq0$ 旋转坐标系下换流器输出的有功功率和无功功率分别为:

$$P = 1.5(U_d I_d + U_q I_q) \quad (5)$$

$$Q = 1.5(U_d I_q - U_q I_d) \quad (6)$$

忽略换流器的功率损耗, 从直流配电系统中吸收的有功与流入交流系统的有功相等, 即:

$$P = U_{dc} I_{dc} \quad (7)$$

其中, U_{dc} 为直流母线电压; I_{dc} 为直流电流。基于 P – U_{dc} 下垂控制的电压外环和电流内环控制模型如式(8)–(12)所示。

$$I_{dref} = \left\{ U_{dc} - [U_{dcref} + K_{dr}(P - P_{ref})] \right\} G_p(s) \quad (8)$$

$$I_{qref} = (Q_{ref} - Q) G_p(s) \quad (9)$$

$$P_{md} = (I_{dref} - I_d) G_i(s) \quad (10)$$

$$P_{mq} = (I_{qref} - I_q) G_i(s) \quad (11)$$

$$\begin{cases} G_p(s) = K_{pp} + K_{pi}/s \\ G_i(s) = K_{ip} + K_{ii}/s \end{cases} \quad (12)$$

其中, I_{dref} 、 I_{qref} 分别为电压外环控制器产生的 d 、 q 轴电流信号参考值; P_{md} 、 P_{mq} 分别为换流器调制解调信号的 d 、 q 轴分量; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为换流器输出有功功率参考值和无功功率参考值; U_{dcref} 为直流母线电压参考值; K_{pp} 和 K_{ip} 、 K_{pi} 和 K_{ii} 分别为外环和内环比例、积分系数; K_{dr} 为下垂系数。

对式(5)和式(7)进行线性化可得:

$$U_{dc(0)} \Delta I_{dc} + I_{dc(0)} \Delta U_{dc} = 1.5(U_{d(0)} \Delta I_d + I_{d(0)} \Delta U_d + U_{q(0)} \Delta I_q + I_{q(0)} \Delta U_q) \quad (13)$$

其中, “ Δ ”表示各电气量稳定运行点处的偏移量; 下标“(0)”表示各电气量稳定运行点处相应的稳态值。

P – U_{dc} 下垂控制中换流器以单位功率因数模式运行时无功分量为0, 即稳定运行时电流的 q 轴分量为0($I_{q(0)}=0$), 换流器所连接交流配电系统中的母线电压 q 轴分量为0($U_{q(0)}=0$)。

换流器连接交流系统时, 交流母线注入电流的 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{cases} I_{od} = \frac{U_{od} - U_{gd}}{R_g + sL_g} \\ I_{oq} = \frac{U_{oq} - U_{gq}}{R_g + sL_g} \end{cases} \quad (14)$$

其中, U_{gd} 和 U_{gq} 分别为交流系统电压 U_g 的 d 、 q 轴分量; R_g 和 L_g 分别为交流系统线路的电阻和电感。

对式(3)和式(14)进行线性化可得:

$$\Delta I_d = \Delta U_{od} \left[sC_f + 1/(R_g + sL_g) \right] \quad (15)$$

对式(1)进行线性化并联立式(15)可得:

$$\Delta U_d = \Delta U_{od} \left[1 + (R_f + sL_f) \left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \right] \quad (16)$$

将式(15)和式(16)代入式(13)中可得:

$$U_{dc(0)} \Delta I_{dc} + I_{dc(0)} \Delta U_{dc} = 1.5 \left\{ \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_f + sL_f) \right] \times \left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) + I_{d(0)} \right\} \Delta U_{od} \quad (17)$$

对式(8)和式(10)进行线性化, 然后联立式(17)得到 P – U_{dc} 下垂控制的换流器输出动态导纳方程 $\Delta Y_{load}(s)$, 见附录中式(A1)。

1.2 直流线路小扰动数学模型

直流线路是直流配电网区别于微电网的主要特征, 因此本文主要关注直流线路对系统稳定性的影响, 建立其小扰动模型。以 π 型集总参数等值电路模型进行分析, 其等效模型见附录中图A2。图中, R_{line} 、 L_{line} 和 C_{line} 分别为直流线路电阻、电感和分布式电容。鉴于 C_{line} 的值为十几到几十 μF ^[19], 不考虑直流线路分布式电容的影响, 直流线路导纳函数为:

$$\Delta Y_{line} = \frac{1}{R_{line} + sL_{line}} \quad (18)$$

直流负荷以及直流型分布式电源模型不再赘述, 具体参见文献[14]。

2 稳定性分析

为了探究直流线路参数的变化对系统稳定性的影响, 下文将主要分析直流线路电阻值、电感值变化对系统稳定性的影响。

2.1 直流线路电阻值变化

在分析电阻值变化对系统稳定性的影响时, 线路直流电感值保持不变。假设线路单位长度电阻值为 $0.15 \Omega / \text{km}$, 分别选取电阻值为 0.4 、 0.6 、 0.8Ω , 采用 P – U_{dc} 下垂控制时系统的奈奎斯特曲线如图1所示。

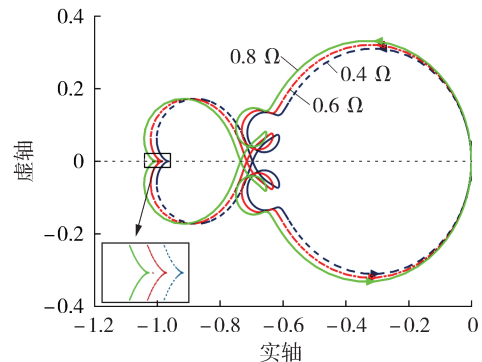


图1 直流线路电阻值变化时的奈奎斯特曲线

Fig.1 Nyquist curves under different values of DC line resistance

示。由图1可知,在 $P-U_{dc}$ 下垂控制模式下,随着直流线路电阻值的增大,系统的奈奎斯特曲线与负实轴的交点距离点 $(-1,0)$ 越来越近,即系统稳定性越来越差,当直流线路电阻值为 $0.8\ \Omega$ 时,系统失稳。

2.2 直流线路电感值变化

在分析直流线路电感值变化对系统稳定性的影响时,保持直流线路电阻值不变。假设线路单位长度电感值为 $0.2\ \text{mH/km}$,分别选取电感值为 0.4 、 0.8 、 $1.2\ \text{mH}$,采用 $P-U_{dc}$ 下垂控制的奈奎斯特曲线见附录中图A3。由图A3可知,在 $P-U_{dc}$ 下垂控制模式下,随着直流电感值的增大,系统的奈奎斯特曲线与负实轴的交点距离点 $(-1,0)$ 越来越近,即系统稳定性越来越差,当直流线路电感值为 $1.2\ \text{mH}$ 时,系统失稳。

综上所述,直流线路参数值变化与系统的稳定性成负相关,随着直流线路电阻值、电感值的增大,系统的稳定性减弱。

3 基于附加阻尼补偿策略的下垂控制

由上述分析可知,由于 $P-U_{dc}$ 下垂控制存在阻尼特性弱、稳定性差等问题,并且随着直流线路电阻值和电感值的增大,系统稳定性减弱。为了提升 $P-U_{dc}$ 下垂控制与直流线路参数值兼容的稳定性,本文提出一种基于综合附加阻尼的控制策略。

3.1 附加阻尼补偿策略原理

当直流配电系统发生小扰动时,系统阻尼决定了直流电压的振荡情况,而附加阻尼对直流电压的振荡有抑制作用,因此通过主动增加系统阻尼可以有效地提高系统稳定性。若附加阻尼提供的电压与系统发生扰动引起的扰动电压大小相等、方向相反,则可完全抑制系统振荡,使系统达到新的稳定状态。

3.2 附加阻尼补偿器结构

综合附加阻尼分别采用阻性补偿、感性补偿和复合补偿形式。

3.2.1 阻性补偿

阻性补偿具有抑制系统振荡和提高系统稳定性的作用,并且采用直流线路电阻作为阻尼补偿时,阻尼补偿函数提供的阻尼与换流器的出力呈正相关关系,系统稳定性更好。为解决阻性补偿环节有直流电流稳态分量流入的问题,采用一阶高通滤波器滤除直流电流的稳态分量。一阶高通滤波器的传递函数为:

$$G_c(s) = sk_c / (s + \omega_c) \quad (19)$$

其中, k_c 和 ω_c 分别为一阶高通滤波器的增益和截止角频率。阻性补偿控制框图如图2所示。

3.2.2 感性补偿

相较于阻性补偿,感性补偿模型中存在微分环

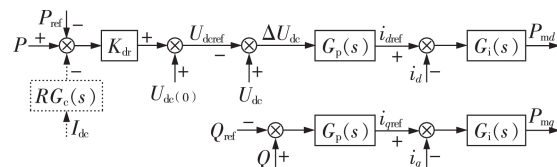


图2 阻性补偿控制框图

Fig.2 Block diagram of resistance compensation control

节,因此不需要额外的滤波环节去除直流电流中的稳态分量。并且当采用直流电感作为阻尼补偿时,换流器出力发生变化,动态响应较快,系统能够快速提供阻尼抑制波动。感性补偿控制框图见附录中图A4。

3.2.3 复合补偿

复合补偿由阻性补偿和感性补偿共同组成,因此其结合了两者的优势,与相同参数的阻性、感性补偿相比具有更好的阻尼特性以及动态响应特性。复合补偿控制框图见附录中图A5。

3.3 附加阻尼补偿数学模型

3.3.1 阻性补偿模型

基于阻性补偿函数的 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂环节电压外环有功通道表达式如式(20)所示,其余的控制模型表达式与 $P-U_{dc}$ 下垂环节的公式相同。

$$I_{dref} = G_p(s) \left\{ U_{dc} - \left[U_{dcref} + K_{dr} \left(P - P_{ref} - I_{dc} \frac{k_c s R_{line}}{s + \omega_c} \right) \right] \right\} \quad (20)$$

对式(10)和式(20)进行线性化,联立式(17)可以得到 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂环节阻性补偿的动态导纳函数 $\Delta Y_{Rload}(s)$,见附录中式(A2)。

$P-U_{dc}$ 下垂控制和基于阻性补偿 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂控制的奈奎斯特曲线如图3所示。

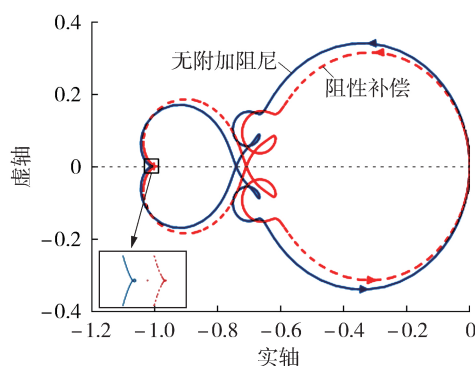


图3 有、无阻性补偿时的奈奎斯特曲线

Fig.3 Nyquist curves with and without resistance compensation

由图3可知,当直流线路电阻参数相同时,本文提出的基于阻性补偿 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂控制的奈奎斯特曲线与负实轴的交点位于点 $(-1,0)$ 的右侧,因此补偿后的系统稳定性更好。

3.3.2 感性补偿模型

同理,基于感性补偿函数的 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂环节

电压外环有功通道表达式如式(21)所示,其余的控制模型表达式与 $P-U_{dc}$ 下垂环节的公式相同。

$$I_{dref} = \left\{ U_{dc} - [U_{dref} + K_{dr}(P - P_{ref} - I_{dc}sL_{line})] \right\} G_p(s) \quad (21)$$

对式(10)和式(21)进行线性化,然后联立式(17)可得到 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂环节感性补偿的动态导纳函数 $\Delta Y_{L_{load}}(s)$,见附录中式(A3)。

$P-U_{dc}$ 下垂控制和基于感性补偿 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂控制的奈奎斯特曲线见附录中图A6。由图A6可知,当直流线路电感参数值相同时,本文提出的基于感性补偿 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂控制的奈奎斯特曲线与负实轴的交点位于点(-1,0)的右侧,因此补偿后的系统稳定性更好。

3.3.3 复合补偿模型

基于复合补偿函数的 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂环节电压外环有功通道表达式如式(22)所示,其余的控制模型表达式与 $P-U_{dc}$ 下垂环节的公式相同。

$$I_{dref} = G_p(s) \left\{ U_{dc} - U_{dref} + K_{dr} \times \left[P - P_{ref} - I_{dc} \left(sL_{line} + \frac{R_{line}s}{s + \omega_c} \right) \right] \right\} \quad (22)$$

对式(10)和式(22)进行线性化,然后联立式(17)可得到 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂环节复合补偿的动态导纳函数 $\Delta Y_{RL_{load}}(s)$,见附录中式(A4)。

$P-U_{dc}$ 下垂控制和基于复合补偿 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制的奈奎斯特曲线见附录中图A7。由图A7可知,当直流线路电阻、电感参数值相同时,所提出的基于复合补偿 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制的奈奎斯特曲线与负实轴的交点位于点(-1,0)的右侧,补偿后的系统稳定性更好。

3.4 阻尼补偿稳定性分析

3.4.1 阻性补偿和复合补偿

保持阻性补偿以及复合补偿参数相同,2种补偿模式的奈奎斯特曲线如附录中图A8所示。由图A8可知,参数相同的情况下,复合补偿提升稳定性效果更加突出。

3.4.2 感性补偿和复合补偿

保持感性、复合补偿参数相同,2种补偿模式的奈奎斯特曲线如附录中图A9所示。由图A9可知,保持参数相同的情况下,采用复合补偿的下垂控制稳定性提升效果更加突出。

综上所述,直流线路参数值越大,系统阻尼特性就相对较弱,而基于阻性、感性和复合补偿函数的控制策略均可以提高系统的阻尼,进而达到增强系统稳定性的效果,且复合补偿兼备感性和阻性补偿的优势,系统稳定性更好。

4 仿真验证与分析

基于DIgSILENT仿真软件搭建的放射式直流配电系统如图4所示,图中,箭头代表系统的潮流方向。考虑到容量问题等因素,以换流器并联的辐射状结构作为研究对象,更具有一般性意义。对电压源型换流器分别采用典型的 $P-U_{dc}$ 下垂控制、基于阻性补偿的 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂控制、基于感性补偿的 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂控制和基于复合补偿的 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制,不同控制模式下换流器的控制参数均相同,其中控制系统参数如附录中表A1所示,直流配电网参数如附录中表A2所示。分析不同控制模式下系统发生扰动后的电压波动情况以及对稳定性的影响。

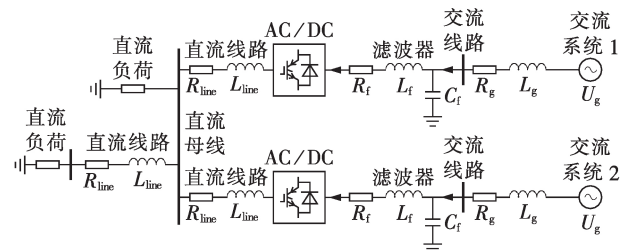


图4 直流配电系统算例结构图

Fig.4 Structural diagram of DC distribution system example

4.1 $P-U_{dc}$ 下垂控制和 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制

仿真系统在4s时直流负荷增加10%,20s时仿真结束。直流电压波形图如图5所示。由图5可知,在4s时直流负荷增大导致直流电压波动失稳,由于 $P-U_{dc}$ 下垂控制阻尼特性弱,致使系统无法恢复稳定。复合补偿具有阻性和感性补偿的特性,因此可以提供更大的阻尼抑制系统振荡,故在负荷增大时,可以使系统达到新的稳定状态,振荡部分对应的奈奎斯特曲线见附录中图A7。

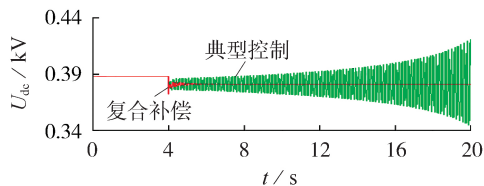


图5 $P-U_{dc}$ 下垂控制复合补偿前、后直流电压波形图

Fig.5 DC voltage waveforms of $P-U_{dc}$ droop control with and without composite compensation

4.2 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂控制和 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制

在4s时直流负荷增加10%,11s时负荷变为原来的1.276倍,20s时仿真结束。直流电压波形图如图6所示。由图6可知,在4s时直流负荷增大到1.1倍,2种补偿方式均可以实现抑制电压波动,使系统达到新的稳定状态,且 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制较 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂控制达到稳态的速度更快,动态特性更好。

在11 s时系统负荷变为原来的1.276倍, $P_{Rcom}-U_{dc}$ 下垂控制系统失稳,而 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制系统达到新的稳态,因此稳定性更好。振荡部分的奈奎斯特曲线见附录中图A10。

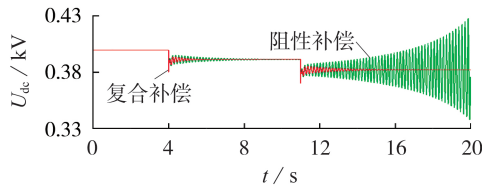


图6 阻性补偿和复合补偿下直流电压波形图

Fig.6 DC voltage waveforms of resistance compensation and composite compensation

4.3 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂控制和 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制

在4 s时直流负荷增加10%,11 s时负荷变为原来的1.276倍,20 s时仿真结束。直流电压波形图如图7所示。由图7可知,在4 s时直流负荷增大到1.1倍,2种补偿方式均可以实现抑制电压波动,使系统达到新的稳定状态,且 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制较 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂控制达到稳态的时间更短,动态特性更好。在11 s时系统负荷变为原来的1.276倍, $P_{Lcom}-U_{dc}$ 下垂控制系统失稳,而 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 下垂控制系统达到新的稳态,因此稳定性更好,振荡部分的奈奎斯特曲线见附录中图A11。

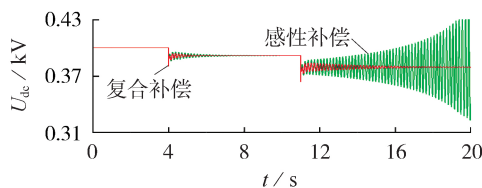


图7 感性补偿和复合补偿下直流电压波形图

Fig.7 DC voltage waveforms of inductance compensation and composite compensation

综上所述,本文提出的基于阻性补偿、感性补偿和复合补偿下垂控制均能实现增强系统阻尼、提高直流配电系统稳定性的目的,而且复合补偿兼备阻性补偿和感性补偿的优势,具有更好的动态特性以及稳定性,仿真结果验证了理论分析的正确性。

5 结论

针对典型 $P-U_{dc}$ 下垂控制存在阻尼特性弱、系统稳定性差等问题,本文提出了基于阻性补偿 $P_{Rcom}-U_{dc}$ 、基于感性补偿 $P_{Lcom}-U_{dc}$ 和基于复合补偿 $P_{RLcom}-U_{dc}$ 的综合附加阻尼策略,经过理论分析以及仿真验证得到结论如下:

(1)直流线路电阻、电感参数的增大均会使系统的阻尼降低,稳定性变差;

(2)阻性补偿策略的阻尼特性相较于 $P-U_{dc}$ 下垂

控制系统效果更好,且阻尼补偿函数提供的阻尼与换流器的出力呈正相关关系;

(3)感性补偿的阻尼特性优于 $P-U_{dc}$ 下垂控制系统,当直流电感作为阻尼补偿的输入信号时,在换流器的出力发生变化时,动态响应较快,系统能够快速提供阻尼抑制波动;

(4)复合补偿兼顾了阻性与感性补偿的优点,其阻尼特性优于阻性和感性补偿,具有更好的动态特性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [2] 和敬涵,周琳,罗国敏,等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):158-165.
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
- [3] 马骏超,江全元,余鹏,等. 直流配电网能量优化控制技术综述[J]. 电力系统自动化,2013,37(24):89-96.
MA Junchao, JIANG Quanyuan, YU Peng, et al. Survey on energy optimized control technology in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 89-96.
- [4] 杜翼,江道灼,尹瑞,等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):139-145.
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.
- [5] 宋国兵,陶然,李斌,等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):2-12.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12.
- [6] 孙峰洲,马骏超,朱洁,等. 直流配电网下垂参数小干扰稳定优化调控方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):48-55.
SUN Fengzhou, MA Junchao, ZHU Jie, et al. Optimized dispatching and control method of droop parameters with assurance of small-signal stability in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 48-55.
- [7] SOUMYA B, LAURA R, PAVOL B. Stability constrained gain optimization of droop controlled converters in DC nanogrids[C]//2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia). Niigata, Japan: IEEJ, 2018:1426-1434.
- [8] 黎立丰,郑天文,郭岩,等. 基于虚拟阻抗相角补偿的并联逆变器谐振抑制方法[J]. 电网技术,2018,42(12):4069-4075.
LI Lifeng, ZHENG Tianwen, GUO Yan, et al. Resonance analysis and suppression strategy for multi-parallel inverters based on phase angle compensation of virtual impedance[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4069-4075.
- [9] JI Yu, WU Ming, LIU Haitao, et al. Bidirectional droop control of interlinking converter in AC/DC hybrid micro grid[C]//2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering. Beijing, China: IEEE, 2016:879-883.

- [10] KANG Xiaoning, MA Xiuda, WANG Hao, et al. Coordinated scheme for automatic voltage control of DC distribution system[C]//12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing, China: IET, 2016: 1-6.
- [11] 朱晓荣, 谢志云, 荆树志. 直流微电网虚拟惯性控制及其稳定性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3884-3891.
- ZHU Xiaorong, XIE Zhiyun, JING Shuzhi. Virtual inertia control and stability analysis of DC micro-grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3884-3891.
- [12] YUN Lei, LIU Dichen, WANG Rusong. Influencing factors analysis of damping characteristics on low frequency oscillation[C]//2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga, Spain: IEEE, 2011: 1-4.
- [13] GUO Li, ZHANG Shaohui, LI Xialin, et al. Stability analysis and damping enhancement based on frequency dependent virtual impedance for DC microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 338-350.
- [14] 赵学深, 彭克, 张新慧, 等. 多端柔性直流配电系统主从控制模式下的稳定性与优化控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 14-20.
- ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Stability and optimal control of multi-terminal flexible DC distribution system under master-slave control mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 14-20.
- [15] 彭克, 张新慧, 陈羽. 适用于多端柔性互联的交直流配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 22-27.
- PENG Ke, ZHANG Xinhui, CHEN Yu. Power flow calculation algorithm for AC-DC hybrid distribution network with multi-terminal flexible interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 22-27.
- [16] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.
- WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2012, 24(2): 12-20.
- [17] 李云丰, 汤广福, 贺之渊, 等. MMC型直流输电系统阻尼控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5492-5503.
- LI Yunfeng, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Damping control strategy research for MMC based HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5492-5503.
- [18] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.
- WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.
- [19] 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.

作者简介:



王琳

王琳(1994—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电系统稳定性分析与控制(E-mail: sdut_wanglin@163.com);

彭克(1983—),男,山东淄博人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为交直流配电网与综合能源系统等(E-mail: pengke@sdut.edu.cn);

刘磊(1996—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电系统稳定性分析与控制(E-mail: liuleishanli@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Stability improvement method for flexible DC distribution system considering comprehensive additional damping

WANG Lin, PENG Ke, LIU Lei, CHEN Yu, JIAO Ticao, LU Maozeng

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Modeling of DC distribution network is the theoretical basis to analyze stability issues, which is of great significance to the operating characteristic of system. Based on the DC distribution system with typical $P-U_{dc}$ droop control, a small signal stability analysis model in term of dynamic admittance is established to investigate the influences of the DC line resistance and inductance parameters on system stability. Analysis of the ratio of output admittance to input admittance of the system is provided to evaluate the overall system stability based on Nyquist admittance ratio criterion. A comprehensive additional damping stability improvement control strategy based on composite compensation is proposed. The system stability before and after compensation is compared and analyzed. The time domain model of DC power distribution system is built by simulation software. The theoretical analysis and simulative results show that the proposed method can enhance system damping and suppress system oscillation.

Key words: DC distribution system; damping compensation; droop control; Nyquist admittance ratio criterion; stability analysis

附录

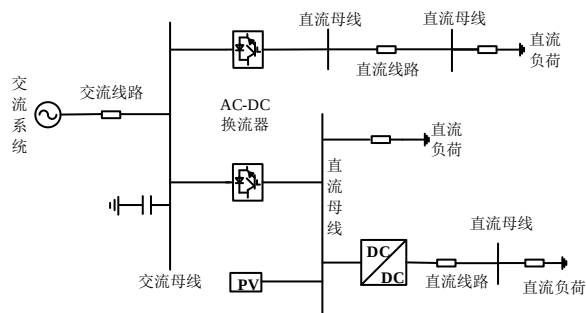


图 A1 直流配电系统框图

Fig.A1 Block diagram of flexible DC distribution system

$$\Delta Y_{\text{load}}(s) = \frac{\frac{3}{2} \left\{ \left(sC_{\text{f}} + \frac{1}{R_{\text{g}} + sL_{\text{g}}} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_{\text{f}} + sL_{\text{f}}) \right] + I_{d(0)} \right\} \left\{ \frac{U_{d(0)}}{U_{\text{dc}(0)}} + G_{\text{p}}(s) G_{\text{i}}(s) \right\}}{U_{\text{dc}(0)} \left\{ \left(sC_{\text{f}} + \frac{1}{R_{\text{g}} + sL_{\text{g}}} \right) (R_{\text{f}} + sL_{\text{f}} + G_{\text{i}}(s)) + \frac{3}{2} K_{\text{dr}} G_{\text{p}}(s) G_{\text{i}}(s) \left[\left(sC_{\text{f}} + \frac{1}{R_{\text{g}} + sL_{\text{g}}} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_{\text{f}} + sL_{\text{f}}) \right] + I_{d(0)} \right] + 1 \right\}} - \frac{I_{\text{dc}(0)}}{U_{\text{dc}(0)}} \quad (\text{A1})$$

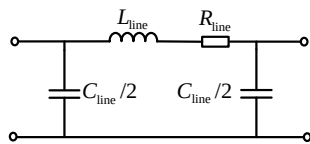
图 A2 直流线路 π 型等效模型

Fig.A2 Equivalent model of π DC line

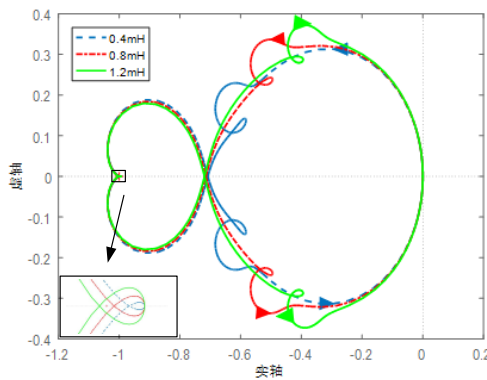


图 A3 直流线路电感值变化的奈奎斯特曲线

Fig.A3 Nyquist curves for different DC line inductance values

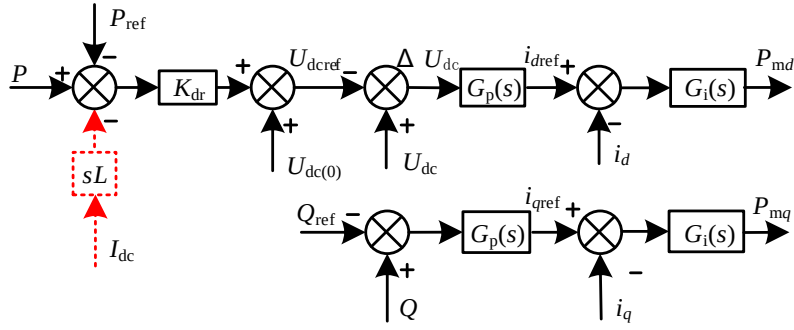


图 A4 感性补偿控制框图

Fig.A4 Control block diagram for inductance compensation

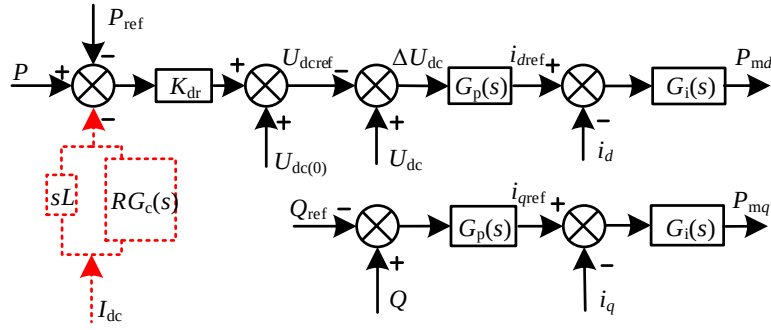


图 A5 复合补偿控制框图

Fig.A5 Control block diagram for composite compensation

$$\Delta Y_{R_load}(s) = \frac{\frac{3}{2} \left\{ \left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_f + sL_f) \right] + I_{d(0)} \right\} \left[\frac{U_{d(0)}}{U_{dc(0)}} + G_p(s) G_i(s) \left(1 - K_{dr} \frac{sk_c R_{line}}{s + \omega_c} \frac{I_{dc(0)}}{U_{dc(0)}} \right) \right]}{U_{dc(0)} \left\{ \left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) (R_f + sL_f + G_i(s)) + \frac{3}{2} K_{dr} G_p(s) G_i(s) \left[1 - \frac{sk_c R_{line}}{U_{dc(0)} (s + \omega_c)} \right] \left[\left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_f + sL_f) \right] + I_{d(0)} \right] + 1 \right\}} - \frac{I_{dc(0)}}{U_{dc(0)}} \quad (A2)$$

$$\Delta Y_{L_load}(s) = \frac{\frac{3}{2} \left\{ \left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_f + sL_f) \right] + I_{d(0)} \right\} \left(\frac{U_{d(0)}}{U_{dc(0)}} + G_p(s) G_i(s) \frac{U_{dc(0)} - sL_{line} K_{dr} I_{dc(0)}}{U_{dc(0)}} \right)}{U_{dc(0)} \left\{ \left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) (R_f + sL_f + G_i(s)) + \frac{3}{2} K_{dr} G_p(s) G_i(s) \left(1 - \frac{sL_{line}}{U_{dc(0)}} \right) \left[\left(sC_f + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_f + sL_f) \right] + I_{d(0)} \right] + 1 \right\}} - \frac{I_{dc(0)}}{U_{dc(0)}} \quad (A3)$$

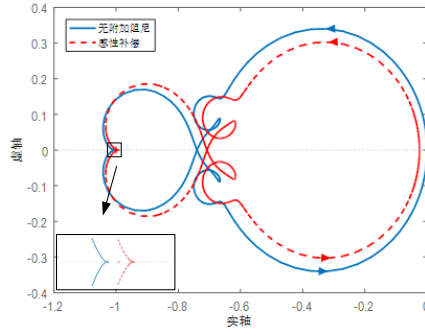


图 A6 感性补偿奈奎斯特曲线

Fig.A6 Nyquist curves for inductance compensation

$$\Delta Y_{\text{RL}_{\text{load}}}(s) = \frac{\frac{3}{2} \left\{ \left(sC_t + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_t + sL_t) \right] + I_{d(0)} \right\} \left\{ \frac{U_{d(0)}}{U_{dc(0)}} + G_p(s) G_t(s) \left\{ \frac{-s^2 K_{dr} I_{dc(0)} L_{line} + s \left[U_{dc(0)} - K_{dr} I_{dc(0)} (\omega_c L_{line} + k_c R_{line}) \right] + \omega_c U_{dc(0)}}{s U_{dc(0)} + \omega_c U_{dc(0)}} \right\} \right\}}{U_{dc(0)} \left\{ \left(sC_t + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) (R_t + sL_t + G_t(s)) + \frac{3}{2} K_{dr} G_p(s) G_t(s) \frac{-s^2 L_{line} + s(U_{dc(0)} - \omega_c L_{line} - k_c R_{line}) + \omega_c U_{dc(0)}}{s U_{dc(0)} + \omega_c U_{dc(0)}} \left\{ \left(sC_t + \frac{1}{R_g + sL_g} \right) \left[U_{d(0)} + I_{d(0)} (R_t + sL_t) \right] + I_{d(0)} \right\} + 1 \right\}} - \frac{I_{dc(0)}}{U_{dc(0)}}} \quad (\text{A4})$$

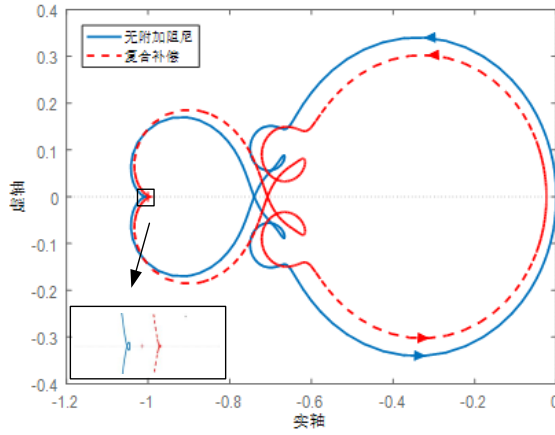


图 A7 复合补偿奈奎斯特曲线

Fig.A7 Nyquist curves for composite compensation

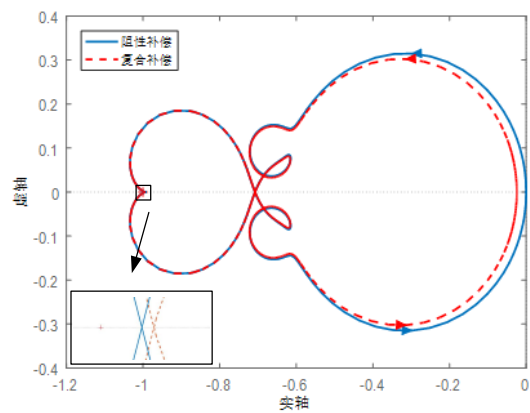


图 A8 阻性补偿和复合补偿奈奎斯特曲线

Fig.A8 Nyquist curves for resistance compensation and composite compensation

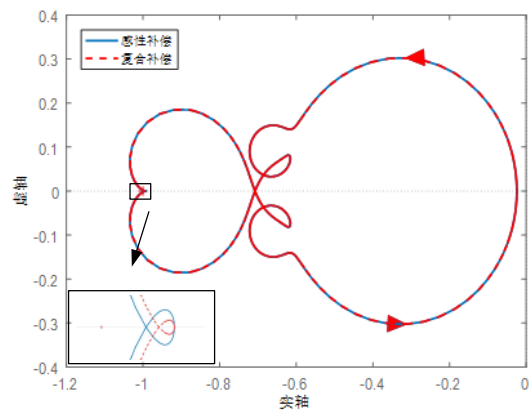


图 A9 感性补偿和复合补偿奈奎斯特曲线

Fig.A9 Nyquist curves for inductance compensation and composite compensation

表 A1 控制系统参数
Table A1 Parameters of control system

类型	变量	数值
电流内环	比例系数 K_{ip}	0.34
	积分系数 K_{ii}	34
	比例系数 K_{pp}	0.205
电压外环	积分系数 K_{pi}	4.27
	下垂系数 K_{dr}	2

表 A2 直流配电网参数
Table A2 Parameters of a DC distribution network

类型	变量	数值
电压源型换流器	交流侧相电压有效值 U_d/V	220
	直流侧电压有效值 U_{dc}/V	400
直流配电线路	线路电阻 R_{line}/Ω	0.15
	线路电感 L_{line}/mH	0.2

高通滤波器	增益 k_c	25.6
	截止角频率 ω_c	40
阻尼补偿	阻性补偿系数	0.15
	感性补偿系数	0.2

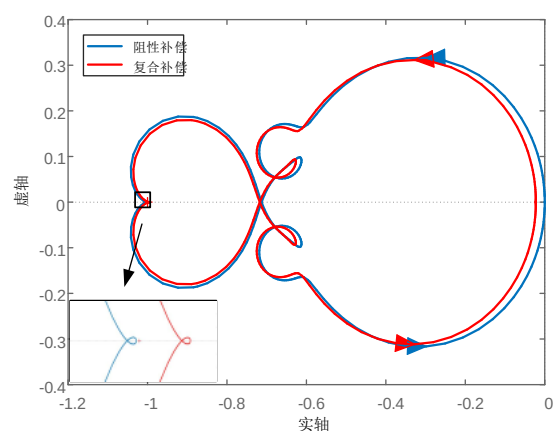


图 A10 阻性补偿和复合补偿奈奎斯特曲线

Fig.A10 Nyquist curves for resistance compensation and composite compensation

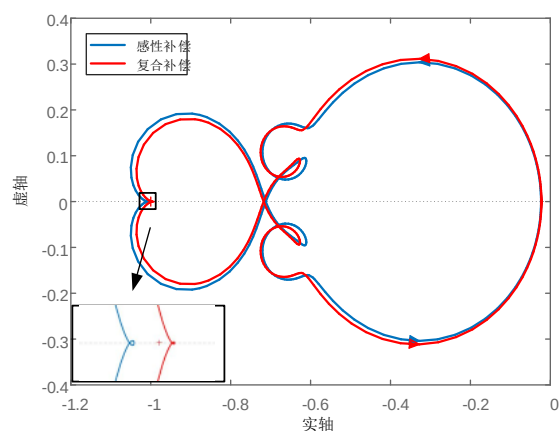


图 A11 感性补偿和复合补偿奈奎斯特曲线

Fig.A11 Nyquist curves for inductance compensation and composite compensation