

基于状态反馈附加阻尼控制的柔性直流电网抑制低频振荡

倪斌业, 向往, 鲁晓军, 文劲宇

(华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了提升交直流互联系统的动态稳定性, 研究了利用多端柔性直流输电系统阻尼交流系统低频振荡的方法。分析了柔性直流电网接入后系统的振荡模态, 研究了直流电网对交流系统稳定性的影响, 并基于全维状态空间反馈设计了柔性直流系统的附加阻尼控制器。系统振荡时该附加阻尼控制器能够输出附加控制量, 调节各换流站的有功功率, 从而抑制系统的振荡。以含有四端柔性直流电网的新英格兰 10 机系统为例进行了仿真研究, 仿真结果表明, 引入了该控制器的柔性直流电网能够很好地抑制原系统的低频振荡, 改善系统的动态性能。

关键词: 直流电网; 低频振荡; 交直流互联电网; 小干扰分析; 附加阻尼控制

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.007

0 引言

随着电网互联规模的日益增大, 系统互联引发的区域间低频振荡问题已经逐渐成为困扰电网安全稳定运行、限制电网传输能力的瓶颈之一^[1-4]。针对含有高压直流输电 (HVDC) 系统的交直流混联电网, 通过控制直流输电系统的有功出力, 可快速抑制振荡, 从而提高交流系统的动态稳定性并增大安全传输容量。文献[5-8]针对常规直流输电系统, 采用紧急功率支援、功率协调控制等方式抑制交流电网的低频振荡。与常规 HVDC 系统相比, 柔性直流输电技术具备自换相能力、有功功率和无功功率可解耦控制、不会发生换相失败等技术优势。近年来, 其在全球范围内得到了广泛的发展和应用^[9], 我国也在大力建设柔性直流输电工程^[10-13]。由于柔性直流输电技术控制自由度大且可快速切换换流站运行方式, 所以理论上能进一步抑制交流低频振荡。

针对含有柔性直流输电系统的交直流混联电网, 通过设计附加控制器调节柔直换流器的有功功率和无功功率, 能够有效地抑制区域间低频振荡, 改善系统的动态性能^[14-18]。文献[14]基于广域测量系统, 通过模型预测控制确定直流系统的有功和无功功率的最佳值, 并采用固定的频率预测和调节功率指令, 以抑制低频振荡。文献[15]采用集中式控制方案, 提出了一种适用于多条 HVDC 线路的集中式协调控制器的设计方法, 该控制器可以很好地提高小型电力系统的阻尼。为避免丢失集中控制通信的风险, 文献[16]将同伦理论应用到柔性直流换流器的控制器设计中, 得到具有鲁棒性的分散式控制

器。文献[17]通过输入-输出精确反馈线性化将非线性系统转化为线性化系统, 再通过线性系统控制器的设计方法, 设计多条 HVDC 线路的协调控制结构以提高系统的稳定性。文献[18]通过观察所提的李雅普诺夫函数, 提出了一种应用于多条 HVDC 线路或多端柔性直流输电 (MTDC) 系统的集中式控制策略。

上述文献提出的控制策略, 主要针对的是点对点的 HVDC 线路或简单的 MTDC 系统, 对于更为复杂的柔性直流电网可能并不适用。因此, 本文提出了一种适用于柔性直流电网的附加阻尼控制器 (SDC), 该控制器能够根据交流系统的频率波动调节柔性直流系统注入交流系统的功率, 从而阻尼交流系统的低频振荡。首先介绍了直流系统和交流系统的建模方法, 然后分析了测试系统接入柔性直流电网前后系统振荡模态的变化, 并利用分析结果设计了附加阻尼控制器, 最后以含有四端柔性直流环网的新英格兰 10 机系统为例, 通过比较不同扰动后系统的响应情况, 验证了所提控制器的阻尼效果。

1 交直流系统建模

1.1 直流系统建模

电压源型换流器 (VSC) 和交流系统的等效电路模型如图 1 所示。VSC 的运行状态由图 1 中有功功率的方向 (即电流 i_{dc} 的正负) 决定。当 i_{dc} 为正时, VSC 从交流电网吸收功率, 换流器运行于整流状态;

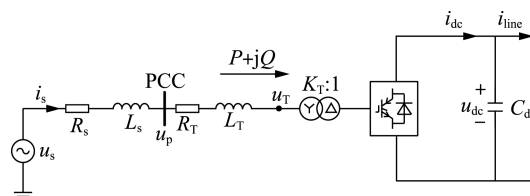


图 1 VSC 和交流系统的等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of VSC and AC system

收稿日期: 2018-05-20; 修回日期: 2018-12-15

基金项目: 国家自然科学基金智能电网联合基金资助项目 (U1766211)

Project supported by the Smart Grid Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (U1766211)

当 i_{dc} 为负时, VSC 发出功率, 换流器运行于逆变状态。本文中以整流方向为有功功率/电流的正向。

VSC 建模采用 dq 坐标系, 其中 d 轴与公共耦合点 (PPC) 的正序电压同向。PCC 的电压相位通过锁相环 (PLL) 获得, 根据文献 [19-20] 可以得到如图 2 所示的 PLL 传递函数框图, 图中 φ 为 PCC 电压 u_p 的实际相角, θ 为经 PLL 测得的 u_p 相角。由此可以得到 PLL 的状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{dx_{pll}}{dt} = K_{lpll}\varphi - K_{lpll}\theta \\ \frac{d\theta}{dt} = K_{ppll}\varphi - K_{ppll}\theta + x_{pll} \end{cases} \quad (1)$$

其中, 可取 $K_{ppll} = 30$ 、 $K_{lpll} = 500$, 以获得较快的响应速度。

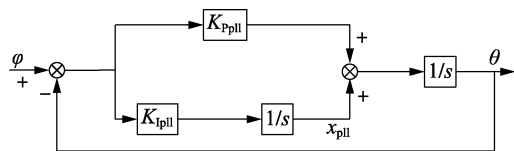


图 2 PLL 传递函数框图

Fig.2 Block diagram of PLL transfer function

设 PCC 的频率为 ω , 忽略换流器损耗, 得到换流器交流侧动态方程为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_T}{L_T} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_T}{L_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_T} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{pd} \\ u_{pq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_T} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{Td} \\ u_{Tq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

直流侧动态方程为:

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (i_{dc} - i_{line}) \quad (3)$$

换流器交直流间电压、电流方程分别为:

$$u_{Td} = \frac{1}{2} K_T M_d u_{dc} \quad (4)$$

$$u_{Tq} = \frac{1}{2} K_T M_q u_{dc}$$

$$i_{dc} = \frac{3}{4} K_T M_d i_{sd} + \frac{3}{4} K_T M_q i_{sq} \quad (5)$$

其中, M_d 和 M_q 为 dq 坐标系下的调制比, 由控制系统给出。控制系统的建模可参考文献 [21], 此处不再赘述。通过上述电压电流方程, 结合 PLL 和控制系统的模型, 即可建立单个换流站的模型。

换流站之间通过直流线路进行连接, 直流线路

不断扩展即可构成直流电网。广义的多端直流电网的结构如图 3 所示。换流站 k 处直流电压的微分方程为:

$$\frac{du_{dck}}{dt} = \frac{1}{C_{dck}} \left(i_{dck} - \sum_{j \in \Omega_k} i_{linej} \right) \quad (6)$$

其中, Ω_k 为与点 k 连接的支路编号的集合; i_{linej} 为支路 j 上的线路电流; i_{dck} 为换流站 k 输出的电流; C_{dck} 为换流站 k 的电容。

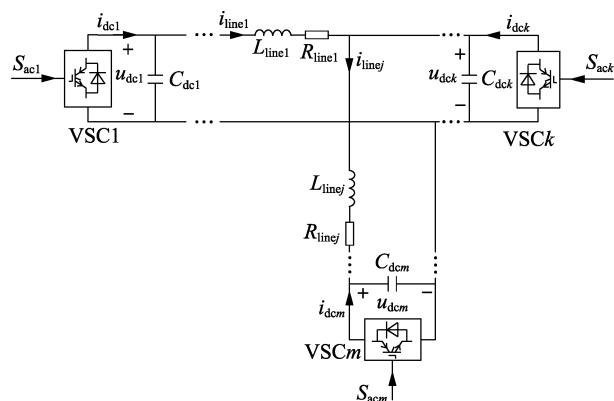


图 3 多端直流电网示意图

Fig.3 Schematic diagram of multi-terminal DC grid

连接换流站 k 、 m 的线路 j 上电流的微分方程为:

$$\frac{di_{linej}}{dt} = \frac{1}{L_{linej}} (-R_{linej} i_{linej} + u_{dck} - u_{dcm}) \quad (7)$$

其中, R_{linej} 和 L_{linej} 分别为线路 j 的电阻和电感; u_{dck} 和 u_{dcm} 分别为点 k 和点 m 上的直流电压。结合图 3 中结构, 利用电容和电感上的微分方程即可得到直流电网的模型。

1.2 交直流系统线性化模型

为了研究交流系统的低频振荡, 需要推导交直流系统的线性化模型。对 1.1 节推导的直流系统模型进行线性化处理, 可以得到直流系统的线性化状态空间方程为:

$$\dot{\mathbf{X}}_{dc} = \mathbf{A}_{dc} \mathbf{X}_{dc} + \mathbf{B}_{dc} \mathbf{u}_{dc} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{X}_{dc} = [\mathbf{U}_{dc} \ \mathbf{I}_{line}]^T$, $\mathbf{U}_{dc}$ 为各换流站的直流电压, $\mathbf{I}_{line}$ 为直流各线路上的电流; $\mathbf{u}_{dc}$ 为设计控制器时的系统输入量, 暂不定义。

交流系统的线性化状态空间方程为:

$$\dot{\mathbf{X}}_{ac} = \mathbf{A}_{ac} \mathbf{X}_{ac} + \mathbf{B}_{ac} \mathbf{X}_{dc} \quad (9)$$

其中, $\mathbf{X}_{ac}$ 为交流电网中各发电机的状态变量, 包括功角、转速、暂态电势等, 其具体含义与发电机模型的阶数有关; $\mathbf{B}_{ac} \mathbf{X}_{dc}$ 使交流系统的状态变量与直流系统的状态变量联系起来。

将直流系统和交流系统的状态空间模型相结合, 得到交直流互联系统的线性化状态空间模型具体如下:

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_{ac} \\ \dot{\mathbf{X}}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ac} & \mathbf{B}_{ac} \\ 0 & \mathbf{A}_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{ac} \\ \mathbf{X}_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_{dc} \end{bmatrix} \mathbf{u}_{dc} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (10)$$

2 系统稳定性分析

本文测试系统即交直流互联系统拓扑如图4所示,图中交流系统为新英格兰10机39节点系统,直流系统为四端柔性直流环网。新英格兰系统常用于研究多机交流系统的动态特性,包含10台同步发电机、39条母线和46条线路,其中10号发电机采用的是与该系统连接的其他交流系统的等值模型,可以看作是具有很低阻抗、高惯性时间常数的无穷大母线,交流系统的详细参数可以参见文献[22]。直流系统采用四端环网结构,系统级控制采用主从控制方式,VSC1作为主站采用定直流电压控制,VSC2—VSC4作为从站采用定有功功率控制,功率指令值分别为400 MW、200 MW、-200 MW。

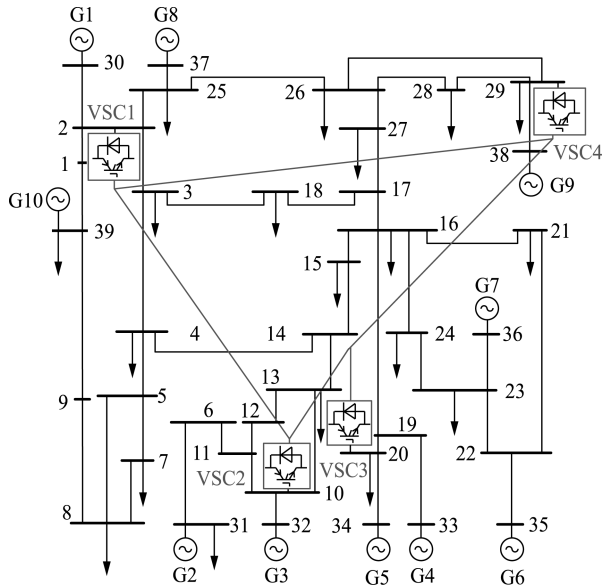


图4 交直流互联系统拓扑

Fig.4 Topology of AC/DC interconnected system

对图4所示的交直流互联系统进行低频振荡模态分析,分析结果见附录A中表A1。此外,为了分析直流电网接入对交流系统稳定性的影响,还需要分析原交流系统的振荡模态并与交直流系统进行对比。因此,在调节原系统的潮流分布使其与交直流系统的交流潮流分布接近后,对原系统进行了低频振荡模态分析,分析结果见附录A中表A2。

分析附录A表A1和表A2中数据可知,本文算例中柔性直流电网的接入使得系统的弱阻尼模态的阻尼比和频率均发生了变化,其中阻尼比增加,提高了低频振荡的衰减速度,系统的动态性能有所改善。

3 附加阻尼控制器的设计

考虑到柔性直流输电系统具有较快的控制速

率,可以在直流控制系统中设计附加阻尼控制器,使柔性直流电网快速吸收或者补偿交流系统的功率波动,进一步发挥抑制低频振荡的作用。

3.1 线性分析

针对式(10)所描述的线性化开环系统,可以得到其特征值和特征向量分别为:

$$\mathbf{A}\mathbf{u}_i = \lambda_i \mathbf{u}_i \quad (11)$$

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{v}_i^T \quad (12)$$

其中, $\mathbf{u}_i$ 和 $\mathbf{v}_i$ 分别为特征值 λ_i 的右特征向量和左特征向量。附加控制器的目的是阻尼交流系统的低频振荡,因此需要对低阻尼的振荡模态(即附录A表A1中的模态7和模态9)进行分析。

对于特定特征值 λ_i ,其在不同输入量下的相对可控性 $\mathbf{b}_i$ 可以表示为:

$$\mathbf{b}_i = (\mathbf{v}_i^T \mathbf{B})^T \quad (13)$$

此外,不同输出量下的相对可观性 $\mathbf{o}_i$ 可以表示为:

$$\mathbf{o}_i = \mathbf{C}\mathbf{u}_i \quad (14)$$

将式(13)和式(14)相乘可以得到留数 $\mathbf{R}_i$ 为:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{o}_i \mathbf{b}_i^T \quad (15)$$

留数表征了输出量和输入量之间的相关性,较大的留数值意味着只需要很小的反馈增益即可控制特征值移动,十分有利于控制器的设计。设计控制器时,通过反馈回路即可将目标特征值向复平面的左侧移动,其中反馈回路还应采用移相环节补偿留数的相位以最大化地提高控制性能。移相补偿环节一般使用超前-滞后校正模块,此外反馈回路中还应串入高通滤波器以避免稳态误差,故可以得到控制器的传递函数为:

$$H(s) = \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^m \quad (16)$$

上述即为常规附加阻尼控制器的结构。为了最大化地利用柔性直流电网的控制能力,下文提出了一种新型的附加阻尼控制器设计方法。

3.2 基于状态反馈的附加阻尼控制器设计

在图4所示的测试系统中,柔性直流电网的主控站控制直流电压以维持直流系统的稳定运行,其有功功率不可调制,而其他从站的有功功率均可控,可以通过调制从站的有功功率以阻尼交流低频振荡,故选取附加阻尼控制器输出的控制量为从站的有功功率附加量 ΔP_{ref} 。

对于式(10)所描述的线性开环系统,附加阻尼控制器的输出即为矩阵 $\mathbf{u}$,为了改变系统特定的特征值,可以通过设计全维状态反馈控制器 $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{X}$,使得闭环系统 $\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{X}$ 的特征值在复平面上任意移动。根据具体需求确定特征值的变化量 $\Delta\lambda$,一般将特征值左移以抑制系统的低频振荡,本文中

将系统的模态 7 和模态 9 对应的特征值左移 0.3 以提升其阻尼比。可以通过程序计算得到全维状态反馈增益矩阵 K , 此处不再赘述。

考虑到全维状态反馈需要对系统中的每个状态量进行采样和反馈, 这在实际系统中是不现实的, 故本文采用部分反馈结构, 筛选出合适的状态量作为反馈信号。对于通过计算得到的全维状态反馈增益矩阵 K , 选出其中模值较大的反馈增益, 将其对应的状态量作为部分反馈的反馈信号, 并在考虑状态量可测量的基础上, 对反馈信号进行筛选, 确定最适合作为反馈信号的状态量, 记选出的状态量为 ΔX_1 ; 选取反馈信号在矩阵 K 中对应的增益值作为新的反馈增益矩阵, 记为 K_1 。观察 K 中数据可知, 发电机 G3、G5、G9 的频率偏差量所对应的反馈增益最大, 因此选择上述 3 个频率偏差量作为反馈信号 ΔX_1 ,

其对应的反馈增益矩阵 K_1 为:

$$K_1 = \begin{bmatrix} -151 & -43 & -301 \\ -55 & -300 & -139 \\ -110 & -31 & -272 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由于被控换流站和反馈信号的测量点间有一定的物理距离, 信号的传输有通信延时, 用一阶惯性环节 $D(s)$ 表示通信延时, 且 $D(s) = 1/(1+0.001s)$ 。计及通信延时, 在反馈回路加入延时环节, 记为 $H_d(s)$ 。此外, 考虑到控制量和反馈信号相位不一致, 需要在反馈回路进行相位补偿以最大化可控性。结合 3.1 节介绍的内容, 计算控制量和反馈信号间的留数矩阵 R_1 , 并考虑通信延时产生的相位差, 通过式 (16) 中的移相环节进行相位补偿。记补偿相位后的反馈回路矩阵为 $H_1(s)$, 本文算例中 $H_1(s)$ 如式 (18) 所示。

$$H_1(s) = \begin{bmatrix} 151 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.229s}{0.219s} & 43 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.272s}{1+0.187s} & 301 \frac{1}{1+0.001s} \frac{1+0.323s}{1+0.158s} \\ 55 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.249s}{1+0.204s} & 300 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.243s}{1+0.210s} & 139 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.286s}{1+0.178s} \\ 110 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.229s}{1+0.219s} & 31 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.276s}{1+0.185s} & 272 \frac{1}{1+0.001s} \frac{10s}{1+10s} \frac{1+0.327s}{1+0.156s} \end{bmatrix} \quad (18)$$

结合上述分析可以得到柔性直流电网附加阻尼控制器的原理图如图 5 所示。

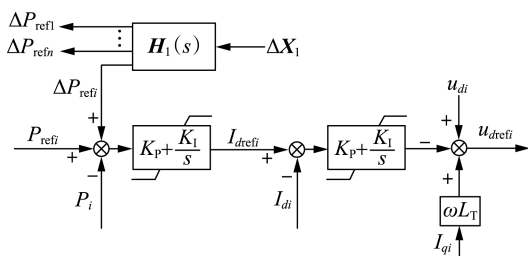


图 5 柔性直流电网附加阻尼控制的原理图

Fig.5 Principle diagram of flexible DC grid with supplementary damping control

3.3 控制器阻尼效果分析

对引入了上述附加阻尼控制器的交直流系统进行低频振荡模态分析, 并将分析结果列于表 1 中。分析附录 A 表 A1 和表 1 中数据可知, 附加阻尼控制器使得系统的弱阻尼模态的阻尼比和频率均发生了变化, 其中阻尼比显著增大, 提高了低频振荡的衰减速度, 系统的动态性能有所改善。从上述模态分析的结果可以初步判断, 采用本文提出的附加阻尼控制器有利于阻尼交流低频振荡。

4 仿真分析

为了验证柔性直流电网及本文所提的附加阻尼控制器的阻尼效果, 在稳态运行点设置了不同程度的扰动, 对柔性直流电网系统的动态响应进行了仿

表 1 引入附加阻尼控制器的系统低频振荡模态分析
Table 1 Low-frequency oscillation modal analysis of system with SDC

编号	阻尼比	振荡频率/Hz	主导参与机组
1	0.075 2	1.572 8	G1, G8
2	0.062 4	1.521 6	G4, G6, G7
3	0.055 8	1.495 1	G4, G6, G7
4	0.054 4	1.349 4	G1, G8
5	0.040 4	1.331 7	G2, G3
6	0.039 3	1.144 9	G2, G3, G6, G7
7	0.160 1	1.147 6	G3, G5, G6, G9
8	0.453 2	1.088 2	G5, G9
9	0.279 9	0.745 6	G5, G10

真分析。

4.1 三相接地短路故障

$t=1$ s 时, 系统 Bus18 处发生三相短路故障, $t=1.1$ s 时故障切除。仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 原先的交流系统在受扰后, 发电机功率和功角振荡衰减缓慢, 20 s 后仍有明显的振荡现象; 加入柔性直流电网的互联系统在受扰后, 发电机功率和功角振荡衰减加快, 阻尼效果提高, 但是提高程度有限, 在扰动初期与交流系统的响应差别不大; 当柔性直流电网中配置了常规的附加阻尼控制器后, 发电机功率和功角振荡在扰动发生初期就很快得到抑制, 12 s 后振荡基本衰减完毕, 系统的动态性能得到改善; 而采用了状态反馈附加阻尼控制后, 功率和功角的振荡在 10 s 内基本衰减完毕, 系统的

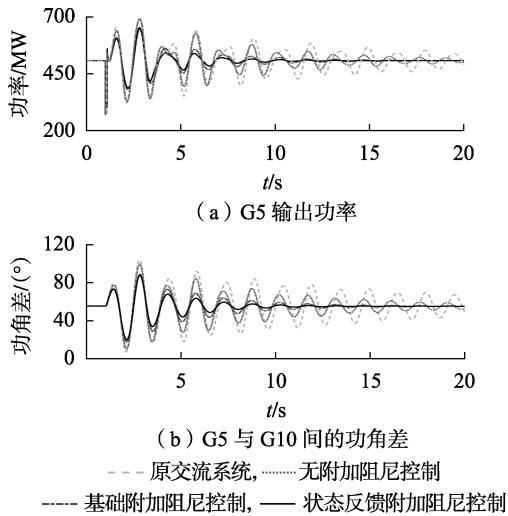


图6 三相短路故障下交流系统响应曲线

Fig.6 Response curves of AC system under three-phase short circuit

动态性能得到了显著的改善。

此外,由于附加阻尼控制器在扰动后会调节各换流站的功率,势必会对直流电网的运行产生影响,因此还需观察直流系统的响应特性,确保故障期间柔性直流系统仍处于正常工作状态。直流系统的动态响应特性见附录A中图A1。从图中可以看出,扰动后各换流站的功率在附加阻尼控制器的作用下不断调节以平抑交流系统振荡,在此过程中各换流站的功率和直流电压均在允许范围内,直流系统处于正常工作状态。

从上述分析结果中可以看出,柔性直流电网在配置了附加阻尼控制器后可以大幅改善交流系统的动态性能,其中状态反馈附加阻尼控制器的控制效果明显优于常规附加阻尼控制器,并且在附加阻尼控制下直流系统也能正常工作。此外,由于篇幅限制,并且发生三相瞬时短路故障对系统造成的冲击最大,具有典型性,故后续不再展示直流系统的仿真波形。

4.2 负荷突变

$t=1\text{ s}$ 时, Bus20 处所接负荷发生+10%的突变扰动。仿真结果如图7所示。

由图7可知,引入了附加阻尼控制器的柔性直流电网能够很好地抑制功率和功角振荡,而采用状态反馈附加阻尼控制时振荡衰减速度要快于常规附加阻尼控制,这说明了该控制器在提高系统动态性能上的优势。此外,从图7(b)中可以看出,原交流系统和交直流系统在扰动后系统的稳态功角差发生了变化,而附加阻尼控制器使得稳态功角差的变化量减小,系统在扰动后接近初始状态;同样地,采用状态反馈附加阻尼控制器会使得系统在扰动后更接近初始状态,反映了其在提高系统稳定性上的优势。

上述分析结果进一步验证了状态反馈附加阻尼

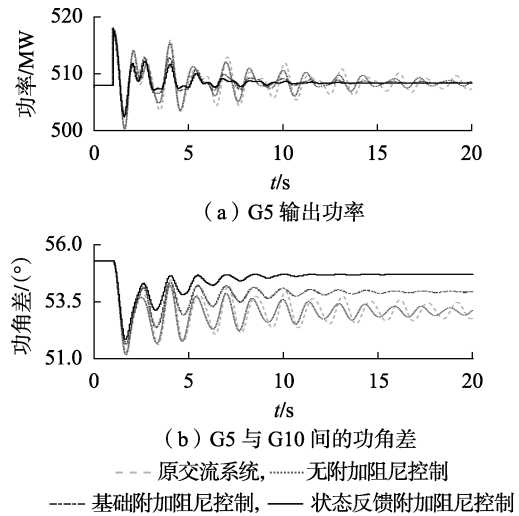


图7 负荷突变下交流系统响应曲线

Fig.7 Response curves of AC system after load sudden changing

控制器的控制效果。

4.3 切除线路

$t=1\text{ s}$ 时,切除 Bus25 和 Bus26 之间的联络线。仿真结果如图8所示。扰动后原交流系统的功率和功角发生剧烈振荡,系统已经失去稳定,为了便于比较2种控制器的控制效果,图8所示的系统响应曲线中未做出原交流系统的响应曲线。

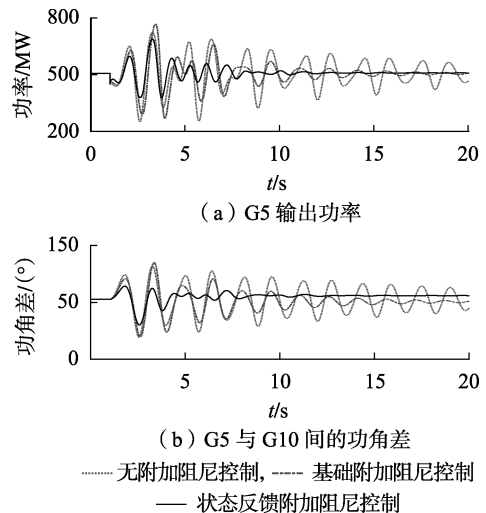


图8 切除线路后交流系统响应曲线

Fig.8 Response curves of AC system after cutting line

由图8可知,交直流系统的功率和功角振荡衰减缓慢;采用常规附加阻尼控制器加大了系统对低频振荡的阻尼,但控制效果较前2种情况也有所下降;而采用状态反馈附加阻尼控制器仍能快速地抑制功率和功角的振荡,进一步验证了本文所提的控制结构的优势。

5 结论

针对交流电网中低频振荡问题,本文提出了利

用柔性直流电网阻尼低频振荡的方案,并基于状态反馈设计了附加阻尼控制器以增强柔性直流电网的阻尼效果。以含有四端直流环网的新英格兰10机系统为例进行了仿真研究。模态分析与时域仿真结果表明,本文提出的状态反馈附加阻尼控制能够显著提高系统阻尼比,改善系统的稳定性和动态性能,故本文提出的状态反馈附加阻尼控制的控制效果明显优于常规附加阻尼控制。

此外,本文所提附加阻尼控制器主要针对有功功率进行控制,而柔性直流输电系统可以采用有功无功解耦控制,因此除有功功率附加控制之外还可以研究无功功率的附加控制,以实现与交流系统的电压支撑,进一步发挥柔性直流输电系统的优势和潜力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ROGERS G. Power system oscillations[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000: 5-9.
- [2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definition. Definition and classification of power system stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [3] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994: 15-20.
- [4] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 312-316.
- [5] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 147-153.
- [6] LI Y, REHTANZ C, RUBERG S, et al. Wide-area robust coordination approach of HVDC and FACTS controllers for damping multiple interarea oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1096-1105.
- [7] MAO X M, YAO Z, LIN G, et al. Coordinated control of interarea oscillation in the China Southern Power Grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 845-852.
- [8] 鲍颜红, 王永昆, 方勇杰, 等. 基于广域测量信息和直流功率支援的低频振荡抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 118-122.
BAO Yanhong, WANG Yongkun, FANG Yongjie, et al. DC power support for damping low frequency oscillations based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 118-122.
- [9] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [10] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [11] 李程昊, 詹鹏, 王劲宇, 等. 适用于大规模风电并网的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 1-7.
LI Chenghao, ZHAN Peng, WEN Jinyu, et al. A multi-terminal VSC-HVDC system control strategy for large wind farms integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 1-7.
- [12] 王曦, 李兴源, 魏巍, 等. 柔性直流和常规直流互联输电系统协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 102-108.
WANG Xi, LI Xingyuan, WEI Wei, et al. Coordinated control strategy for interconnected transmission system of VSC-HVDC and LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 102-108.
- [13] 周密, 徐箭, 孙元章. 多端柔性直流电网平抑风电波动的协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 29-35.
ZHOU Mi, XU Jian, SUN Yuanzhang. Coordinated control restraining wind power fluctuation of VSC-MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 29-35.
- [14] FUCHS A, IMHOF M, DEMIRAY T, et al. Stabilization of large power systems using VSC-HVDC and model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 480-488.
- [15] ERIKSSON R, SÖDER L. Coordinated control design of multiple HVDC links based on model identification[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2010, 60(4): 944-953.
- [16] PIPELZADEH Y, CHAUDHURI B, GREEN T C. Control coordination within a VSC HVDC link for power oscillation damping: a robust decentralized approach using homotopy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1270-1279.
- [17] ERIKSSON R, SÖDER L. On the coordinated control of multiple HVDC links using input-output exact linearization in large power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 118-125.
- [18] ERIKSSON R. On the centralized nonlinear control of HVDC systems using Lyapunov theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1156-1163.
- [19] JOVICIC D. Phase locked loop system for FACTS[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1116-1124.
- [20] ZHOU J Z, DING H, FAN S, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [21] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 7-10.
- [22] CHOW J. Power system toolbox 3.0[M]. Colborne, Canada: Cherry Tree Scientific Software, 2008: 7-21.

作者简介:



倪斌业

倪斌业(1995—),男,江苏连云港人,博士研究生,主要研究方向为柔性直流输电技术与直流电网(E-mail: nibinye@foxmail.com);

向往(1990—),男,湖北仙桃人,博士,主要研究方向为柔性直流输电技术、直流电网、交直流电网运行与控制等(E-mail: xiangwang1003@foxmail.com);

鲁晓军(1990—),男,湖北襄阳人,博士研究生,主要研究方向为柔性直流换流器建模与直流电网稳定性分析等(E-mail: luxiaojun@hust.edu.cn)。

(下转第57页 continued on page 57)

- CSEE, 2008, 28(25): 30-37.
- [27] 梁才, 刘文颖, 温志伟, 等. 电网组织结构对其自组织临界性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 6-11.
LIANG Cai, LIU Wenyong, WEN Zhiwei, et al. The influences of power grid structure on self-organized criticality[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 6-11.
- [28] 但扬清, 刘文颖, 朱艳伟, 等. 含大规模风电集中接入的电网自组织临界态辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 127-133.
DAN Yangqing, LIU Wenyong, ZHU Yanwei, et al. Self-organized critical state identification of power grid with centralized integration of large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 127-133.
- [29] 杨卫东, 刘若晨, 蔡景. 属性权重确定方式及在衡量机型相似度中的应用[J]. 飞机设计, 2014, 34(5): 58-61.
YANG Weidong, LIU Ruochen, CAI Jing. The approach to weight determination and its application in measurement of similarity between aircraft[J]. Aircraft Design, 2014, 34(5): 58-61.
- [30] University of Washington Electrical Engineering. 30 bus power flow-test case[EB/OL]. (1993-08-15)[2014-08-20]. http://www.ee.Washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm.
- [31] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.

作者简介:



刘美君

刘美君(1993—),女,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统脆弱性评估(E-mail: 564851778@qq.com);

李华强(1965—),男,河北清苑人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析、稳定及优化(E-mail: lihuaqiang@scu.edu.cn)。

Critical node identification of power grid considering voltage level

LIU Meijun¹, LIU Jilong², LI Huaqiang¹, ZHANG Hongli³, CHEN Yuqing⁴, LUO Yide⁵

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Binzhou Electric Power Supply Company, Binzhou 256600, China;

3. State Grid Xuzhou Electric Power Supply Company, Xuzhou 221005, China;

4. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, China;

5. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211100, China)

Abstract: Based on the basic principle of Theil's entropy measure and system voltage level, a critical node identification method is proposed for power grid, which comprehensively considers the node static voltage stability and distribution equilibrium of branch transfer power flow. According to the influence mechanism of load variation on system voltage amplitude growth and transmission power flow variation, the Theil's entropy model of voltage growth rate and the Theil's entropy model of weighted flow impact rate are built to describe the equilibrium of system voltage growth and power flow variation. The weight analysis method combined with binary feature analysis method and entropy weight method is adopted to integrate the indexes, and thus the comprehensive evaluation index with the consideration of both the subjective preferences and the objective data is obtained to accurately identify the critical node. The simulation results of IEEE 30-bus system and a real regional southwest power system verify the validity of the proposed model.

Key words: voltage growth rate; weighted flow impact rate; voltage level; Thiel's entropy; difference within group; difference between groups

(上接第50页 continued from page 50)

Low-frequency oscillation suppression using flexible DC grid based on state feedback supplementary damping control

NI Binye, XIANG Wang, LU Xiaojun, WEN Jinyu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To improve the dynamic stability of AC/DC interconnected system, an approach that uses VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) to damp low-frequency oscillations is proposed. The oscillation mode of AC/DC system is analyzed, and the influences of DC grids on the stability of AC grids are studied. Based on the modal analysis, supplementary damping controller of VSC-MTDC is designed. This controller can output supplementary control signals and regulate the active power of each converter during oscillation to suppress the system oscillation. Simulations are carried on New England 10-machine power system with four-terminal DC grid. Test results indicate that the proposed controller damps the low-frequency oscillation and improves the system dynamic performance.

Key words: DC grid; low-frequency oscillation; AC/DC interconnected system; small-signal analysis; supplementary damping control

附录

附录 A

表 A1 交直流互联系统低频振荡模态分析

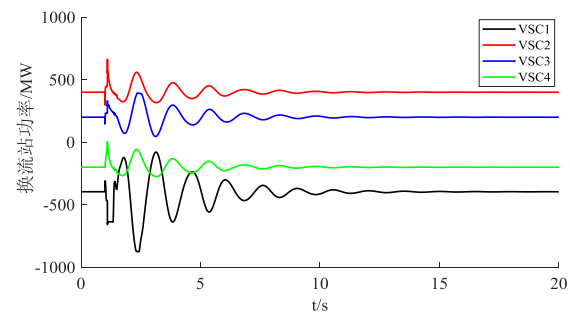
Table A1 Modal analysis results of AC/DC system

编号	阻尼比	振荡频率	主导参与机组
1	0.0753	1.5713	G1, G8
2	0.0522	1.4955	G4, G6, G7
3	0.0429	1.4656	G4, G6, G7
4	0.0407	1.3327	G1, G8
5	0.0584	1.3525	G2, G3
6	0.0415	1.1746	G2, G3, G6, G7
7	0.0343	1.0980	G3, G5, G6, G9
8	0.0392	1.0208	G5, G9
9	0.0334	0.7041	G5, G10

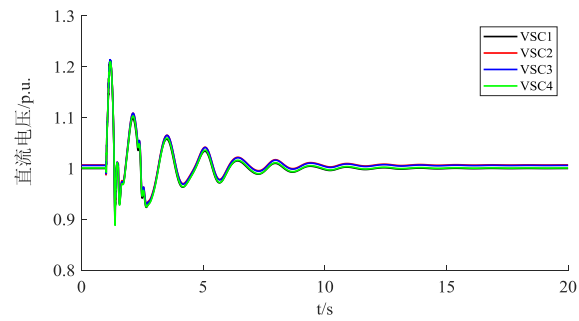
表 A2 原交流系统低频振荡模态分析

Table A2 Modal analysis results of primary AC system

编号	阻尼比	振荡频率	主导参与机组
1	0.0699	1.5696	G1, G8
2	0.0523	1.4949	G4, G6, G7
3	0.0433	1.4607	G4, G6, G7
4	0.0398	1.3266	G1, G8, G9
5	0.0576	1.3511	G2, G3
6	0.0408	1.1627	G2, G3, G6, G7
7	0.0281	1.0907	G6, G9
8	0.0260	0.9916	G5, G9
9	0.0175	0.6619	G5, G10



(a)各换流站功率



(b)各换流站直流电压

图 A1 三相短路后直流系统响应曲线

Fig. A1 Response of the DC system after short circuit