

交直流电力系统区域振荡混合控制策略

马燕峰¹, 杜江龙^{1,2}, 赵书强¹

(1. 华北电力大学 电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 天津市电力公司, 天津 300072)

摘要: 通过计算模式阻尼比对机组有功出力和直流线路有功功率的灵敏度, 得到参与振荡模式的关键机组和直流线路。提出基于阻尼比灵敏度的由机组出力调整和直流传输功率调整两部分组成的混合控制策略, 以此抑制大区域电网的区域功率振荡。在软件 DIgSILENT 中搭建了 8 机交直流电力系统, 通过策略实施前后的结果对比, 表明所提控制策略能够有效地抑制交直流电力系统的区域振荡, 提高了系统的稳定性。

关键词: 交直流电力系统; 阻尼比; 灵敏度分析; 振荡; 控制; DIgSILENT; 稳定性; 遗传算法

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.010

0 引言

随着全国联网的战略规划持续推行, 直流输电在长距离输电中扮演着重要角色, 但大区域交直流电力系统的安全稳定问题非常复杂, 而低频振荡不仅成为严重危及互联系统安全运行的重要因素, 还制约着系统间功率传输。因此, 对交直流电力系统功率振荡进行研究, 并采取相应的控制策略具有重要的理论价值和现实意义。

目前, PSS 仍是增强系统阻尼、抑制电网低频振荡的首选, 但 PSS 对区域模式阻尼效果不明显, 大量安装问题复杂, 而基于广域信号的 PSS 仍处于理论研究阶段^[1-2]; 此外, STATCOM、TCSC 等 FACTS 设备也具有抑制低频振荡的作用^[3], 但现场安装不普遍。对于交直流电力系统, PSS 和直流调制等附加控制的协调也是难点^[4]。文献[5-7]提出在大电网的区域振荡中, 采用降低关键机组出力(包括解列机组)、提高直流功率、降低交流通道功率等一次侧措施抑制系统低频振荡。作为阻尼控制器的补充, 合理调整系统运行方式将使振荡获得良好的阻尼。文献[1, 8]以参与因子作为求取与振荡模式强相关机组的性能指标, 并提出相应的调出力策略, 但参与因子不能明确机组参与的方向信息。文献[9]从特征值灵敏度的角度阐述了运行方式与小干扰稳定的关系, 并给出了灵敏度的计算方法; 文献[10]提出了特征值对运行参数的灵敏度; 文献[11-12]计算了特征值对运行参数的灵敏度, 分析了它们对系统小干扰稳定的影响;

文献[13-14]在特征值灵敏度基础上计算了阻尼比灵敏度, 并通过合理地安排机组的出力以改善小干扰稳定性影响的功率传输能力。目前, 特征值对运行灵敏度的研究多集中在交流系统和调整机组出力, 而应用于交直流系统、将调整机组出力和直流线路功率相结合制定控制策略的相关研究并不多见。

本文提出基于阻尼比灵敏度的混合控制策略, 利用调整机组出力抑制振荡的快速有效性, 以及直流输电的高度可控、短时过负荷、快速改变潮流等特点, 将 2 种方式配合来提高模式阻尼。在阻尼比对发电机有功出力和直流有功潮流的灵敏度的基础上, 采用优化算法得出机组出力和直流功率的调整值, 将阻尼比提高至安全阈值, 当所有模式的阻尼比均在安全范围内, 则系统达到稳定要求。最后以 8 机交直流电力系统为例, 仿真验证该控制策略的合理性和有效性。

1 交直流系统的灵敏度计算

1.1 交直流系统模型

发电机采用考虑凸极效应和机械阻尼时的二阶模型, 如式(1)所示^[15]。

$$\begin{cases} U_d = X_q I_q \\ U_q = E'_q - X'_d I_d \\ M \Delta \dot{\omega} = \Delta P_m - \Delta P_e - D \Delta \omega = -\Delta P_e - D \Delta \omega \\ \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_d 、 U_q 、 I_d 、 I_q 、 X_q 、 X'_d 、 E'_q 依次为发电机的 d 轴电压、 q 轴电压、 d 轴电流、 q 轴电流、 q 轴同步电抗、 d 轴暂态电抗、 q 轴暂态电势; M 为转子惯性时间常数; $\Delta P_e = K \Delta \delta$, K 为同步力矩系数; D 为阻尼转矩系数; $\Delta \omega$ 、 $\Delta \delta$ 分别为转子角速度和功角的微增量。

忽略分布电容, 整流侧采取定电流控制, 逆变侧采取定电压控制, 考虑简化的惯性放大调节器以及控制器的调节时间常数, 直流系统模型为^[16]:

收稿日期: 2013-07-17; 修回日期: 2014-06-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014-MS88); 国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG-019-2012); 河北省自然科学基金资助项目(E2011502014)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014MS88), State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG019-2012) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2011502014)

$$\begin{cases} U_{dr} = 3\sqrt{2} n_r U_r \cos \alpha / \pi - 3X_{cr} I_d / \pi \\ U_{di} = 3\sqrt{2} n_i U_i \cos \beta / \pi + 3X_{ci} I_d / \pi \\ I_d = U_r n_r [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] / (\sqrt{2} X_{cr}) \\ T_1 \Delta \dot{\alpha} = -\Delta \alpha + K_1 \Delta I_d + K_1 \Delta U_{sr} \\ T_2 \Delta \dot{\beta} = -\Delta \beta - K_2 U_{di} + K_2 \Delta U_{si} \\ X_d \dot{I}_d = -R_d I_d + U_{dr} - U_{di} \end{cases} \quad (2)$$

其中, U_{dr} 、 U_r 、 U_{sr} 分别为整流器直流侧、交流侧电压和电压设定值; U_{di} 、 U_i 、 U_{si} 为逆变器直流侧、交流侧电压和电压设定值; n_r 、 n_i 、 X_{cr} 、 X_{ci} 为换流变压器的变比和换相电抗; I_d 为直流线路电流; R_d 、 X_d 分别为直流线路电阻和电抗, X_d 中包含平波电抗; α 、 β 、 γ 分别为触发角、触发超前角、换相角; K_1 、 K_2 分别为定电流和定电压控制的惯性环节放大系数; T_1 、 T_2 为时间常数。

交流网络采用准稳态模型,只保留发电机节点和直流节点,消去联络节点后的线性化模型为^[17]:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{xyF} \\ \Delta U_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{Z}_{FL} \begin{bmatrix} \Delta I_{xyF} \\ \Delta I_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, ΔU_{xyF} 、 ΔI_{xyF} 、 ΔU_{xy} 、 ΔI_{xy} 分别为各发电机和各换流站电压、电流的偏差量在系统公共 $x-y$ 坐标系中的分量; \mathbf{Z}_{FL} 为实部和虚部分开的阻抗矩阵。

对发电机和直流换流器模型的代数方程进行线性化,并将发电机方程转化为同步坐标,则建立交直流电力系统标准的状态方程为 $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}$, 其中, \mathbf{A} 为状态系数矩阵,内含各机组和换流站节点直角坐标形式的电压和电流。 \mathbf{X} 为:

$$\mathbf{X} = [\Delta \delta_1 \quad \cdots \quad \Delta \delta_n \quad \Delta \omega_1 \quad \cdots \quad \Delta \omega_n \quad \Delta \alpha_1 \quad \Delta \beta_1 \quad \Delta I_{d1} \quad \cdots \quad \Delta \alpha_l \quad \Delta \beta_l \quad \Delta I_{dl}]^T \quad (4)$$

1.2 阻尼比灵敏度计算

对于状态矩阵 \mathbf{A} , 特征值为 $\lambda_k = \alpha_k + j\omega_k$, α_k 为衰减系数, ω_k 为振荡角频率, 阻尼比为 $\zeta_k = -\alpha_k / \sqrt{\alpha_k^2 + \omega_k^2}$, 有 $\mathbf{A}\mathbf{u}_k = \lambda_k \mathbf{u}_k$ 和 $\mathbf{v}_k^T \mathbf{A} = \mathbf{v}_k^T \lambda_k$, 其中 \mathbf{v}_k 、 \mathbf{u}_k 分别为 λ_k 的左、右特征向量。设矩阵 \mathbf{A} 是运行参数 σ 的函数, 则有 $\mathbf{A}(\sigma)\mathbf{u}_k = \lambda_k \mathbf{u}_k$, 则 λ_k 、 \mathbf{u}_k 为 σ 的隐函数, 等式两边对 σ 求偏导数, 然后左乘 \mathbf{v}_k^T , 整理可得特征值 λ_k 对 σ 的灵敏度为^[15]:

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial \sigma} = \frac{\mathbf{v}_k^T \frac{\partial \mathbf{A}(\sigma)}{\partial \sigma} \mathbf{u}_k}{\mathbf{v}_k^T \mathbf{u}_k} \quad (5)$$

$\frac{\partial \lambda_k}{\partial \sigma}$ 是复数, 反映 σ 微小变化时 λ_k 的移动方向(相位)和大小。 $\frac{\partial \mathbf{A}(\sigma)}{\partial \sigma}$ 取稳态工况下的 σ 值计算。当 σ 取为发电机节点和换流站节点的有功功率 P_i 时, 由于 P_i 不直接显含在 \mathbf{A} 中, $\frac{\partial \lambda_k}{\partial P_i}$ 不能直接得到, 需借助节点 i 处的电压和电流作为中间变量进行求

取。于是, 第 k 个特征值对第 i 个参数 P_i 的灵敏度可表示为:

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial P_i} = \sum_{m=1}^{2n} \frac{\partial \lambda_k}{\partial U_m} \frac{\partial U_m}{\partial P_i} + \sum_{m=1}^{2n} \frac{\partial \lambda_k}{\partial I_m} \frac{\partial I_m}{\partial P_i} \quad (6)$$

其中, n 为网络节点数。

阻尼比灵敏度在特征值灵敏度基础上计算^[13]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta_k}{\partial P_i} &= \frac{1}{\sqrt{\alpha_k^2 + \omega_k^2}} \frac{-\omega_k^2}{\alpha_k^2 + \omega_k^2} \frac{\partial \alpha_k}{\partial P_i} + \\ &\frac{1}{\sqrt{\alpha_k^2 + \omega_k^2}} \frac{\alpha_k \omega_k}{\alpha_k^2 + \omega_k^2} \frac{\partial \omega_k}{\partial P_i} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\frac{\partial \alpha_k}{\partial P_i}$ 、 $\frac{\partial \omega_k}{\partial P_i}$ 分别为相应特征值灵敏度实部和虚部。

特征值灵敏度能反映参数 P_i 变化引起的特征值变化; 阻尼比反映系统振荡模式衰减的快慢, 其灵敏度更直观地反映了运行参数对系统稳定的影响程度和方向, 可明确需要调整的机组和直流线路。

2 基于阻尼比灵敏度的控制策略

模式的阻尼比反映了模式的稳定性, 通过计算阻尼比对机组出力和直流有功潮流的灵敏度, 调整灵敏度高的机组或直流线路传输功率, 可以快速提高相应模式的阻尼比。当模式的阻尼比不低于可接受的安全值 ζ_{lim} 时, 系统的小干扰稳定性得以保证, 文中取 $\zeta_{lim} = 3\%$ 。

2.1 控制策略求解

根据低频振荡产生机理、灵敏度分析方法和交直流混合电力系统的客观条件, 控制策略求解步骤如下。

a. 潮流计算。 通过潮流计算, 求得各发电机、换流站节点的电压、电流等数据。

b. 特征分析。 计算矩阵 \mathbf{A} 的特征根、阻尼比、参与因子等, 确定弱阻尼振荡模式及主要参与机组。

c. 阻尼比灵敏度计算。 针对区域弱阻尼模式, 通过式(5)~(7)求解该模式下对机组有功出力 P_{G1} 、 P_{G2} 、 \cdots 、 P_{Gn} 和直流传输功率 P_{D1} 、 P_{D2} 、 \cdots 、 P_{Dl} 的阻尼比灵敏度。设 $S_{ki} = \frac{\partial \zeta_k}{\partial P_i}$, 则 S_{kGi} 和 S_{kDi} 分别为第 k 个振荡模式阻尼比对发电机 i 的有功出力和直流线路 i 的有功输送的灵敏度。

d. 灵敏度排序。 提取弱阻尼振荡模式 k 的阻尼比灵敏度, 并分别对 S_{kG1} 、 S_{kG2} 、 \cdots 、 S_{kGn} 和 S_{kD1} 、 S_{kD2} 、 \cdots 、 S_{kDl} 进行排序。当 $S_{ki} > 0$ 时, 即该元件与阻尼比正相关, 增加 P_i , 可以提高模式阻尼; 同理, 当 $S_{ki} < 0$ 时, 则减小 P_i 。

e. 策略制定。 根据步骤 **d** 的灵敏度, 为了使所有模式阻尼均满足小干扰稳定性的要求, 在调节代价最小的情况下, 以阻尼比灵敏度为指标, 采用优化算法求取各发电机和直流线路的调整量。目标函数为:

$$C = \min(\sum |\Delta P_{Gi}| + \sum |\Delta P_{Di}|) \quad (8)$$

其中, $|\Delta P_{Gi}|$ 为发电机 i 调整量的绝对值; $|\Delta P_{Di}|$ 为直流线路 i 调整量的绝对值。

研究表明,系统结构不变和运行方式变化不大时,阻尼比灵敏度 S_{ζ_i} 与 P_i 呈近似线性关系^[14],因此系统调整后的阻尼比应满足如下关系:

$$\zeta_{\lim} - \zeta_{j0} \leq \sum (S_{jGi} \Delta P_{Gi}) + \sum (S_{jDi} \Delta P_{Di}) \quad j=1, \dots, m_1 \quad (9)$$

其中, ζ_{j0} 为第 j 个弱阻尼振荡模式的阻尼比初值; m_1 为系统中需要提高的弱阻尼振荡模式数。

除此之外,还应考虑发电机发出功率和直流线路输送功率的限值以及系统的功率平衡:

$$P_{G\min} - P_{G0} \leq \Delta P_{Gi} \leq P_{G\max} - P_{G0} \quad (10)$$

$$P_{D\min} - P_{D0} \leq \Delta P_{Di} \leq P_{D\max} - P_{D0} \quad (11)$$

$$\sum P_{Gi} - \sum P_{Li} = 0 \quad (12)$$

其中, $P_{G\max}$ 和 $P_{G\min}$ 分别为发电机 i 的有功出力上、下限值; $P_{D\max}$ 和 $P_{D\min}$ 分别为直流输电线路 i 的输送容量上、下限值; 下标 0 表示相应变量稳态值; P_{Li} 为节点 i 负荷。

上述控制策略可以采用优化方法求取。

f. 策略校验。通过自动发电控制(AGC)或调度人员命令实施上述控制策略后,校验是否产生新的弱阻尼振荡模式。若产生,则转步骤 **a**; 否则,优化结果即为最终控制策略。

2.2 遗传算法优化

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,其基本流程如图 1 所示^[18]。

根据图 1 优化控制策略,设机组出力和直流功率的调整量作为决策变量,对决策变量编码并随机生成初始群体,以式(8)作为适应度函数,式(9)—(12)作为约束条件,对初始群体进行遗传操作,产生新一代群体,用适应度函数评价个体,往复迭代,直到找到

最优的个体,即为所需控制策略。

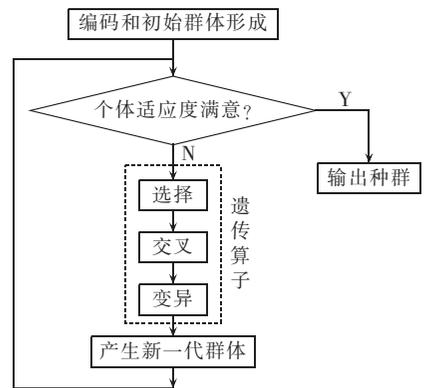


图 1 遗传算法基本流程图
Fig.1 Flowchart of genetic algorithm

3 算例仿真验证

3.1 8 机交直流系统

8 机交直流电力系统如图 2 所示,该系统中有 8 台同步电机,其中 G_1 为参考机, G_6 为调相机,相关参数见中国电科院 PSASP 数据包。

利用 DIgSILENT/PowerFactory 软件计算出该系统机电模式的特征值及阻尼比如表 1 所示。

由表 1 数据可知,模式 7 是典型的弱阻尼模式,模式 2 略大于 3%,DIgSILENT 输出 2 种模式的发电机转速变量的参与因子如图 3 所示,其他各模式阻尼比均有较大的裕度,其参与因子分析在此省略。通过图 3 可知,模式 2 为地区模式,模式 7 为区域模式。

阻尼比灵敏度不仅反映机组出力和直流功率对模式阻尼的灵敏程度,还可明确参与振荡的方向,物理概念清晰。弱阻尼振荡模式的阻尼比对机组有功出力和直流功率的灵敏度,如表 2 所示。

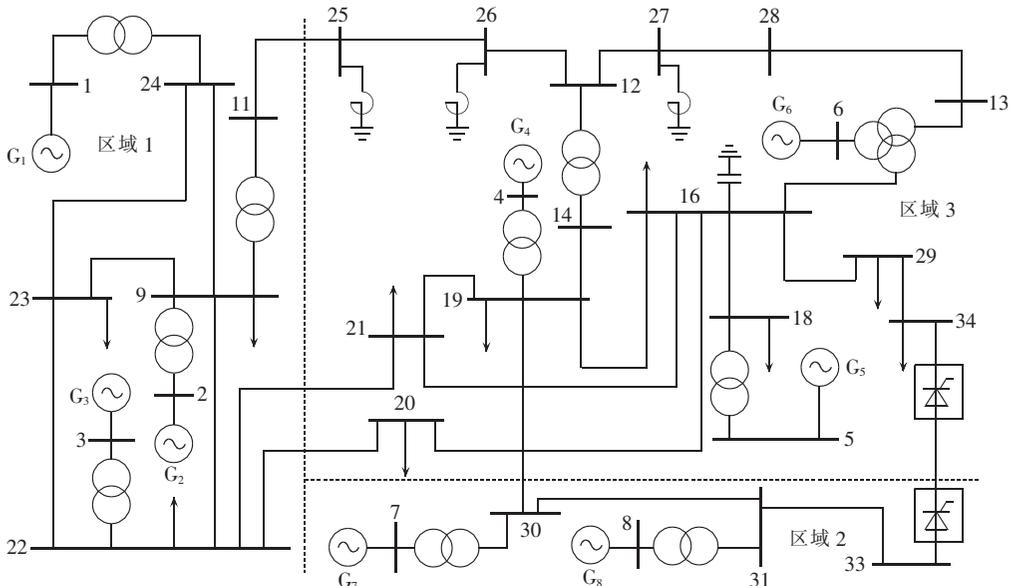


图 2 8 机交直流电力系统结构
Fig.2 Structure of 8-generator AC-DC power system

表 1 机电模式特征值及阻尼比

Tab.1 Eigenvalue and damping ratio of electromechanical mode

机电振荡模式	特征值	阻尼比
1	-6.473±j15.237	0.391 000
2	-0.425±j13.966	0.030 417
3	-0.391±j10.258	0.038 089
4	-0.435±j9.100	0.047 748
5	-1.507±j8.524	0.174 100
6	-0.272±j6.297	0.043 155
7	-0.0952±j5.021	0.018 957

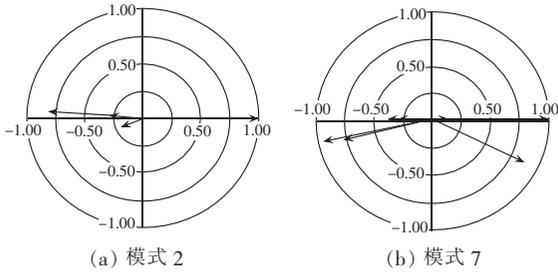


图 3 模式 2 和模式 7 转速变量参与因子

Fig.3 Participation factor of speed in mode 2 and mode 7

表 2 模式 2 和模式 7 的阻尼比灵敏度

Tab.2 Damping ratio sensitivity of mode 2 and mode 7

有功功率	阻尼比灵敏度	
	模式 2	模式 7
P_{G1}	-0.000 462	0.000 098
P_{G2}	0.000 374	0.000 159
P_{G3}	0.000 186	0.000 247
P_{G4}	-0.000 085	0.000 508
P_{G5}	-0.000 063	0.000 392
P_{G7}	-0.000 076	-0.000 523
P_{G8}	-0.000 051	-0.000 415
P_{D1}	-0.000 045	0.000 397

设初始群体为 20,交叉概率为 0.8,每代优选子辈为 2。利用遗传算法计算出考虑直流调整和不考虑直流调整 2 种情况下的控制策略,以及实施控制策略之后系统的阻尼比分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 不考虑直流调整时系统有功调节量及调整后的阻尼比

Tab.3 Amount of active power regulation and corresponding damping ratio,without DC adjustment

$\Delta P_{G4}/MW$	$\Delta P_{G7}/MW$	机电模式阻尼比	
		模式 2	模式 7
10.75	-10.75	0.030 320	0.030 040

表 4 考虑直流调整时系统有功调节量及调整后的阻尼比

Tab.4 Amount of active power regulation and corresponding damping ratio,with DC adjustment

$\Delta P_{G4}/MW$	$\Delta P_{G7}/MW$	$\Delta P_{D1}/MW$	机电模式阻尼比	
			模式 2	模式 7
8.45	-8.45	6.1	0.030 064	0.030 078

3.2 仿真分析

选择负荷变化和断线 2 种具有代表性的扰动,对比采取控制策略前后的结果加以分析。

3.2.1 设定负荷扰动

在 51 s 时,节点 19 的负荷突增 40 MW,持续 2 s 后恢复,节点 19 与节点 30 的联络线 19-30 的振荡曲线如图 4 中实线所示。

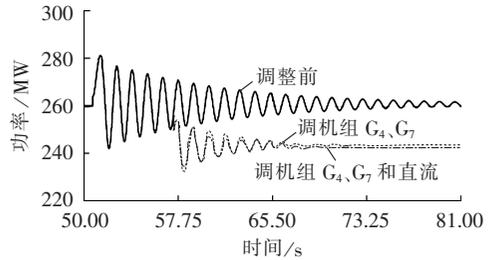


图 4 节点 19 的负荷突增扰动,调控前后的振荡曲线
Fig.4 Tie-line oscillation curve responding to sudden load increase of bus19,comparison between with and without control measures

对系统实施同样扰动,在 58 s 时,实施表 3 控制策略,振荡曲线如图 4 中虚线所示;实施表 4 控制策略,振荡曲线如图 4 中点划线所示。仿真结果表明,实施策略后,振荡曲线快速收敛,阻尼振荡效果明显。

3.2.2 设定断线扰动

当 51 s 时,交流联络线 19-30 发生单相断线扰动,1.5 s 后重合,联络线 19-30 上发生大幅度的功率振荡,如图 5 中实线所示。

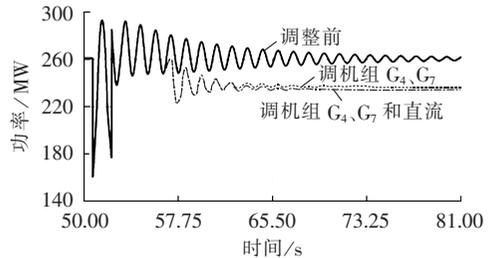


图 5 线路 19-30 单相断线扰动,调控前后的振荡曲线
Fig.5 Tie-line oscillation curve responding to single-phase break and reclose,comparison between with and without control measures

对系统实施同样扰动,分别实施表 3 和表 4 的控制策略,振荡曲线分别如图 5 中虚线和点划线所示。仿真结果表明,区域功率振荡收敛效果明显,有力说明该策略对提高系统稳定性和抑制区域振荡的有效性。

同时,通过图 4 和图 5 不同控制策略的比较可知,当控制策略考虑直流线路输送功率时,在达到同样阻尼比要求时,可以使机组的功率调整量减小,同时协调考虑直流线路和机组有功出力调整,可以减小交流线的功率振荡,使系统快速进入稳定状态。

总之,仿真验证了基于阻尼比灵敏度抑制区域振荡的混合控制策略,在二次系统阻尼控制效果不明显时,根据阻尼比灵敏度调整机组有功出力或直流功率,可有效地抑制区域模式的低频振荡。面对日益庞大

和复杂的电网,此策略可为调度人员决策提供参考,弥补仅靠经验判断的不足。

4 结语

本文针对交直流混合电网区域功率振荡,提出基于阻尼比灵敏度的机组出力及直流功率调整的混合控制策略。该策略从潮流控制的角度,调整关键机组出力,减弱振荡能量;提高关联紧密的直流线路功率,控制电网潮流分布,及时防止振荡恶化。通过阻尼比灵敏度明确参与振荡模式的关键机组和直流线路,适当调整机组出力或直流功率将模式阻尼比提升至安全值,改善了交直流系统的全局阻尼能力,从整体上提高了系统的稳定性。以 8 机交直流系统为例,仿真验证了该策略的有效性。但是本文控制策略制定时只考虑了系统的功率调整量最小,没有考虑到不同机组有功出力调整以及与直流输送功率调整的经济代价不同,也没有考虑到控制策略实施的时间问题,这将是笔者下一步研究的内容。

另外,随着基于 GPS 和 PMU 的广域测量系统在电网中的不断推广,得到全网实时运行的动态信息成为可能,利用广域在线数据计算得到类似阻尼比灵敏度的性能指标,进而提出实用性更强的广域调度控制策略是本文进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 鲍颜红,徐伟,徐泰山,等. 基于机组出力调整的小干扰稳定辅助决策计算[J]. 电力系统自动化,2011,35(3):88-91.
BAO Yanhong,XU Wei,XU Taishan,et al. Small-signal stability auxiliary decision-making calculation based on power generation adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(3):88-91.
- [2] 陈晓明. 基于广域测量系统的电力系统低频振荡分析及抑制综述[J]. 现代电力,2007,24(6):12-16.
CHEN Xiaoming. Analysis and suppression of low frequency oscillation in power system based on WAMS[J]. Modern Electric Power,2007,24(6):12-16.
- [3] 王康,金宇清,甘德强,等. 电力系统小信号稳定分析与控制综述[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):10-19.
WANG Kang,JIN Yuqing,GAN Deqiang,et al. Survey of power system small signal stability and control[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):10-19.
- [4] 魏巍,王渝红,李兴源,等. 交直流电力系统 PSS 和直流附加控制的协调[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):53-57.
WEI Wei,WANG Yuhong,LI Xingyuan,et al. Coordination of PSS and DC additional controller for AC/DC power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):53-57.
- [5] 梁志飞,肖鸣,张昆,等. 南方电网低频振荡控制策略探讨[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):54-58.
LIANG Zhifei,XIAO Ming,ZHANG Kun,et al. Discussion on control strategy for low frequency oscillation in China Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(16):54-58.
- [6] 陈中. 电力系统小干扰稳定实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):42-46.
CHEN Zhong. Real-time stability control of power system with small disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):42-46.
- [7] KLELN J W,KRANSE P C,FERNANDES L A. Investigation of DC modulation in parallel AC/DC power system[C]//IEEE Winter Meeting. New York,USA:[s.n.],1978:235-238.
- [8] 徐伟,鲍颜红,徐泰山,等. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):98-101.
XU Wei,BAO Yanhong,XU Taishan,et al. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):98-101.
- [9] 刘晓鹏,吕世荣,郭强,等. 特征值对运行方式灵敏度的计算[J]. 电力系统自动化,1998,22(12):9-12.
LIU Xiaopeng,LÜ Shirong,GUO Qiang,et al. Eigenvalue sensitivity against operating condition in power system[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(12):9-12.
- [10] WANG K W,CHUNG C Y,TSE C T,et al. Multimachine eigenvalue sensitivities of power system parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(2):741-747.
- [11] MA Jian,DONG Zhaoyang,ZHANG Pei. Eigenvalue sensitivity analysis for dynamic power system[C]//International Conference on Power System Technology,2006. Chongqing,China:[s.n.],2006:1-7.
- [12] 马林,廖培金,彭书涛. 小干扰稳定中特征值对运行参数的灵敏度[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(4):31-35.
MA Lin,LIAO Peijin,PENG Shutao. Eigenvalue sensitivity with respect to operating parameters in small signal stability analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2005,17(4):31-35.
- [13] CHUNG C Y,WANG Lei,HOWELL F,et al. Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small-signal stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(1):524-530.
- [14] 刘家岩. 计及小干扰稳定约束的发电机有功再调度[D]. 吉林:东北电力大学,2008.
LIU Jiayan. The generator active rescheduling with considering the small signal stability constraint[D]. Jilin:Northeast Electric Power University,2008.
- [15] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:252-258.
- [16] 韩英铎,王仲鸿,陈淮金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京:清华大学出版社,1997:62-72.
- [17] 马燕峰. 交直流混合电力系统低频振荡协调稳定控制[D]. 保定:华北电力大学,2003.
MA Yanfeng. Coordinated stabilized control of low-frequency oscillation of AC/DC hybrid power system[D]. Baoding:North China Electric Power University,2003.
- [18] 雷英杰,张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005:1-10.

作者简介:



马燕峰

马燕峰(1978-),女,河北迁西人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制;

杜江龙(1986-),男,河北定州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail:djl308218@sina.com);

赵书强(1964-),男,河北景县人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析和控制、电力系统规划与可靠性等。

带恒功率负荷的直流微电网母线电压稳定控制策略

李玉梅^{1,2}, 查晓明¹, 刘飞¹, 孙建军¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 呈现负阻尼特性的恒功率负荷与分布式电源接入变换器级联容易导致系统出现振荡, 给直流微电网稳定运行带来隐患。通过建立带恒功率负荷变换器在平衡点的小信号模型, 推导变换器占空比与母线电压的传递函数, 并从理论上分析传统PI控制器不能提高系统稳定性的原因, 进而提出一种提高直流微电网母线电压稳定性的新型控制策略。通过绘制闭环系统的根轨迹图, 分析控制器各参数的变化对系统稳定性的影响。以两源两负荷的直流微电网为例, 建立MATLAB/Simulink仿真模型, 仿真结果表明孤岛和并网运行下采用所提控制策略均可以保证直流微电网稳定运行。

关键词: 微电网; 直流微电网; 恒功率负荷; 振荡; 稳定性; 控制; 电压控制

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.011

0 引言

近年来传统化石能源日趋枯竭, 世界各国大力发展可再生能源。微电网是将分布式能源、负荷、储能装置及能量变换装置等集成而形成的一个可控单元, 是微型化、模块化发电装置与低压分布式电网结合的产物, 其在提高可再生能源利用率、缓解能源需求与环境保护之间的矛盾、提高供电的安全性和可靠性等方面具有重要的意义。它作为一个独立的整体, 既可以并网运行, 也可以孤岛运行。从结构上分类, 微电网可以分为交流微电网和直流微电网。交流微电网可以利用现有的交流系统结构, 但并网时与大电网的同频同相控制实现起来比较复杂, 稳定性问题也比较复杂^[1-2]。由于大多数可再生能源(如光伏、燃料电池)和储能装置都是直流的, 现代化的电子负载如计算机、数据中心、通信设备等都是利用直

流供电, 大多数电机驱动也需要直流供电(变频电机用直流供电可以省掉整流电路), 而且由于没有集肤效应, 直流电缆比交流电缆的传输容量更大, 因此从效率、体积和成本上而言, 直流微电网结构都要优于交流微电网结构。但是, 直流微电网也存在自身的稳定性问题, 尤其是当直流微电网中存在大功率的恒功率负荷(CPL)时, 可能会引起直流母线的不稳定^[3-9]。

现有的一些文献对直流微电网母线电压不稳定机理做了分析, 并提出了一些提高稳定性的措施^[10-16], 其中文献[11]中提出在源侧变换器与恒功率负荷之间增加无源阻尼装置来提高系统的稳定性, 但这种方法会增大系统的体积和损耗; 因此文献[9]中提出把直流微电网看成一个整体, 通过与交流大电网的接口变换器的控制器增加有源阻尼信号来改变变换器的等效阻抗, 这种方法不需要改变原有系统结构, 通过选取合适的控制器参数就可以极大改善系统的稳定性, 但是没有考虑当直流微电网孤岛运行时, 并网变换器不参加运行, 系统的稳定控制问题; 文献[12]针对于带恒功率负荷的DC/DC变换器, 通过在输出

收稿日期: 2014-02-11; 修回日期: 2014-06-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51277137)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51277137)

Hybrid areal oscillation control strategy of AC-DC power system

MA Yanfeng¹, DU Jianglong^{1,2}, ZHAO Shuqiang¹

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300072, China)

Abstract: The sensitivity of mode damping ratio to generator active power or DC line active power is calculated to obtain the critical generators or DC lines participating in the oscillation mode, based on which, a hybrid control strategy consisting of the generator power output regulation and the DC power transmission adjustment is proposed to suppress the areal power oscillation of large power grid. An 8-generator AC-DC power system is built in DIgSILENT and the simulative results are compared between with and without the implementation of the proposed strategy, which shows that, with the proposed strategy, the areal oscillation of AC-DC power system is effectively suppressed and the system stability is enhanced.

Key words: AC-DC power system; damping ratio; sensitivity analysis; oscillation; control; DIgSILENT; stability; genetic algorithms