779

多直流附加阻尼控制的控制敏感点挖掘

林 桥,李兴源,王 曦,赵 睿

(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:直流附加控制是 HVDC 系统抑制低频振荡的有效措施,但是在多直流 HVDC 系统中不同的直流点加 装附加控制所取得的效果和花费的代价不同。提出以达到相同阻尼效果时所需直流调制输出量最小(或单位 调制量下阻尼最大)为目标来选择加装附加控制的直流点。基于线性系统理论推导了控制敏感因子指标。计 算各发电机对某振荡模式的参与因子.取参与因子较大的机组的功角和惯性时间常数进行处理得到综合功 角。通过矩阵束辨识方法确定某直流线路对综合功角主振模式的控制敏感因子。对得到的多直流系统中不 同直流的控制敏感因子排序形成最优控制策略表。控制敏感因子愈高的直流线路愈宜作为附加直流控制的 安装点。最后对某多直流 HVDC 系统进行仿真验证,结果表明了所得最优控制策略表的准确性。

关键词:直流输电:低频振荡:控制:控制敏感因子:直流附加控制:稳定:综合功角曲线:矩阵束辨识 中图分类号: TM 721.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.013

引言

近年来我国高压直流输电系统迅猛发展,各大 区域之间依靠直流线路和交流联络线连接,发展至 今形成了多直流的交直流并联运行系统。相比于纯 交流系统,它在各方面有很大的优势,但同时也引 起了低频振荡等一系列问题[1-3]。低频振荡的出现 有可能导致系统失步.同时还会限制各大区域间联 络线的传送功率。如今已有多种方法可以抑制低频 振荡 直流附加控制就是其中较为有效的一种[4-6]。

多直流的出现使得通过直流附加控制抑制低频 振荡的方法变得更加灵活与复杂[7-10]。已有研究表 明,利用单条直流线路进行控制在提高系统稳定性 方面是有效的,但考虑到经济性,实际工程中不可能 在每个换流站都加装附加控制设备[11]。与此同时, 在不同的直流点加装附加控制所取得的效果和花 费的代价是不同的,因此需要在众多直流中选出最 佳控制点,以达到花费较少而效果较好。

在直流选点的方法中,文献[12-13]虽然考虑多 台强相关机组,在辨识中通过对强相关机组进行加 权平均,但却忽略了不同发电机惯性时间常数的不 同对功角变化的影响[14];文献[11]考虑在不同直流 冲击扰动后,比较由不同直流引起的主振模态对应 的振荡幅值大小确定最佳控制直流,却忽略了其他 模态幅值的影响,并且没有考虑真正的单位控制代 价;文献[15]在可观选点(调制输入信号的选取)时,

收稿日期:2013-07-28;修回日期:2014-05-28 基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51037003);国家 高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A119):国 家电网公司科技重大专项(SGCC-MPLG027-2012)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (51037003), the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2011AA05A119) and the Major Project of State Grid Corporation of China(SGCC-MPLG027-2012)

提出采用单位控制量获得最大阻尼为目标(或相同阻 尼下调制量最小),并推导了相应指标,这是一种衡量 了控制代价与阻尼效果的可观选点的有效方法。与 其对应,本文旨在可观选点确定后,在进行直流最佳可 控选点时,考虑到经济原则,以减小达到相同阻尼效 果时所需直流调制输出量为目标。并且,文中考虑 了发电机的惯性时间常数以及其他模态的影响,依 据所推导的控制敏感因子指标,通过计算得到最优 控制策略表,为选取最佳控制点做好准备。

1 控制敏感点的挖掘机理

系统受到小扰动后或受到大扰动回到平衡点附 近后,其在平衡点附近局部区域的运动特性可线性近 似。因此,基于线性系统分析方法,利用矩阵束辨识 大系统的传递函数,可以考察非线性系统在某一振荡 模式的能控性和能观性,进而选择分离的控制点,使 附加直流阻尼控制器对多直流落点系统后续摆动的 单位阻尼效果最大化。

在平衡点处将系统线性化,可得:

$$\Delta \dot{\boldsymbol{x}}_{1} = \boldsymbol{A}_{11} \Delta \boldsymbol{x}_{1} + \boldsymbol{A}_{12} \Delta \boldsymbol{x}_{2}$$

$$0 = \boldsymbol{A}_{21} \Delta \boldsymbol{x}_{1} + \boldsymbol{A}_{22} \Delta \boldsymbol{x}_{2} + \boldsymbol{b}_{20}^{h} \Delta u_{d}^{h}$$

$$\Delta \boldsymbol{\gamma}_{o}^{n} = \boldsymbol{c}_{1}^{n} \Delta \boldsymbol{x}_{1}$$
(1)

其中,x1为功角、转速等状态变量;x2为母线电压幅值 和相角; u_d^h 为第 h 条直流线路有功功率; Δy_a^n 为第 n台发电机功角。

由式(1)可得:

$$\begin{cases}
\Delta \dot{\mathbf{x}}_{1} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_{1} + \mathbf{b}_{2}^{h} \Delta \mathbf{u}_{d}^{h} \\
\Delta \mathbf{v}_{\sigma}^{n} = \mathbf{c}_{1}^{n} \Delta \mathbf{x}_{1}
\end{cases} \tag{2}$$

其中, $A = A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}$, $b_2^h = -A_{12}A_{22}^{-1}b_{20}^h$

为消除状态变量之间的相互耦合,引入模态矩阵 P. 对初始状态变量 Δx_1 作如下变换:

$$\Delta x_1 = Pz \tag{3}$$



得到式(2)的对角规范形:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + b_2^{h'} \Delta u_d^h \\ \Delta y_g^n = c_1^{n'} z \end{cases}$$
 (4)

其中,P的列向量为与特征值相关联的右特征向量,Q为左特征向量矩阵。满足 $Ap_i=\lambda_ip_i,\lambda_i$ 为矩阵A的特征值, p_i 为P的第 i 列。且满足 $QP=I,QAP=\Lambda$, $b_2^{\prime\prime}=Qb_2^{\prime\prime},c_1^{\prime\prime}=c_1^{\prime\prime}P$,A为矩阵A的对角化矩阵。由式(4)可知, $b_2^{\prime\prime}$ 反映第 h 条直流线路对模式 λ_i 的能控性,而 $c_1^{\prime\prime}$ 反映机组n 对模式 λ_i 的能观性。

对式(4)进行拉氏变换可得系统的传递函数为:

$$G(s) = c_1^{n'} (sI - \Lambda)^{-1} b_2^{h'} = \sum_{i=1}^{F} \frac{R_i^h}{s - \lambda_i}$$
 (5)

$$R_{i}^{h} = c_{1i}^{n'} b_{2i}^{h'} \tag{6}$$

其中, R_i^h 为传递函数 G(s)在极点 λ_i 处的留数。

若式(1)所示系统在小扰动后f个状态变量的初始值分别为 $z_1(0)$ 、…、 $z_f(0)$,那么,状态向量对应的时域响应为:

$$\Delta \mathbf{x}_{1}(t) = \sum_{k=1}^{f} \mathbf{P}_{k} z_{k}(0) e^{(\lambda_{k} + \Delta \lambda)t}$$
 (7)

系统输出的时域响应为:

$$\Delta y_{g}^{n}(t) = \sum_{k=1}^{f} \boldsymbol{c}_{1}^{n} \boldsymbol{P}_{k} z_{k}(0) e^{(\lambda_{k} + \Delta \lambda)t}$$
 (8)

对于给定结构的反馈控制器 H(s),其在极点 λ_i 处表示为:

$$H(\lambda_i) = K e^{j\theta_{Hi}} \tag{9}$$

其中,K 和 θ_{Hi} 分别为阻尼控制器 H(s)对应振荡模式 λ_i 的幅频和相频响应。

若 λ_i 实部的绝对值较小,则 $\Delta \lambda = -R_i^h H(\lambda_i)$ 。由式(6)和式(9),可得:

$$K = |\Delta \lambda| / |\boldsymbol{c}_{1i}^{n'} \boldsymbol{b}_{2i}^{h'}| \tag{10}$$

假设 $\Delta y_g^n(t)s$ 中仅含振荡模式 λ_i ,则控制器输出量的时域响应的最大振幅可表示为:

$$\max \left| \Delta u_{\mathrm{d}}^{h} \right| = \frac{\left| \Delta \lambda \right|}{\left| \boldsymbol{c}_{1i}^{n'} \boldsymbol{b}_{2i}^{h'} \right|} \sum_{k=1}^{f} \left| \boldsymbol{c}_{1}^{n} \boldsymbol{P}_{k} \right| \left| z_{k}(0) \right| \tag{11}$$

其中, $c_1^n P_k$ 为反馈信号对第 k 个模式的能观性。

在确定的观测量中,为使 $\max |\Delta u_{\rm d}^h|$ 取最小值,则需取.

$$\max\left[\left|\boldsymbol{b}_{2i}^{h'}\right|/\sum_{k=1}^{f}\left|\boldsymbol{c}_{1}^{n}\boldsymbol{P}_{k}\right|\left|z_{k}(0)\right|\right] \tag{12}$$

式(12)的分母即f个模式的幅值和,所以可用 |b%| |来衡量 HVDC 阻尼控制器单位输出量的阻尼 效果,由于输入的反馈信号已确定,因此只需考虑主振模态幅值,其值越大越好。

但是需避免激发新的振荡模式,考虑到有其他模式的影响,定义直流控制敏感因子为:

$$\boldsymbol{\eta}_{i}^{h} = \left| R_{i}^{h} \right| / \sum_{i=1}^{F} \left| R_{i}^{h} \right| \tag{13}$$

其中 $,\sum_{i=1}^{F}|R_{i}^{h}|$ 为所需考虑的F个模式的留数模值之和。

该指标不仅衡量 HVDC 阻尼控制器单位输出量的阻尼效果,而且反映控制器对主导振荡模式 *i* 的相对控制能力,数值越大表明控制器对非主导模式的影响越小。

2 控制敏感点的挖掘步骤

发电机的惯性时间常数τ是反映发电机转子机械惯性的重要参数,由它的定义可知,它是转子在额定转速下的动能的 2 倍除以额定功率,其物理意义是指在发电机转子上施加额定转矩后,转子从静止状态启动加速到额定转速所需的时间。它与发电机转子角度变化速度有很大的联系,因此将在步骤 3 中考虑它的影响。具体挖掘步骤如下。

步骤 1:通过小扰动程序计算得到系统的振荡模式,筛选出关键的弱阻尼振荡模式 λ :。

步骤 2:计算系统中各主要发电机对某振荡模式 M_i 的参与因子,取参与因子相对较大机组的功角曲线 $\Delta \delta_a^a$,且其对应的参与因子为 x_a 。

步骤 3:对各个主要发电机的功角曲线按式(14) 处理后得到综合功角 δ_{como}

$$\delta_{\text{com}} = \frac{\sum_{n=1}^{p} \tau_n x_n \delta_g^n}{\sum_{n=1}^{p} \tau_n x_n}$$
 (14)

其中, x_n 为第n台发电机的参与因子,此处忽略较小的机组; τ_n 为第n台发电机的惯性时间常数;p为所考虑的强相关发电机数量。

步骤 4:通过矩阵束辨识方法确定多直流系统中某直流线路对综合功角 δ_{com} 中主振模式 λ_i 的灵敏度。其基本思想是:在某直流功率整定值处施加阶跃扰动 Δu_d^i ,检测扰动后综合功角的变化量 $\Delta \delta_{com}$,并通过矩阵束辨识 $\Delta \delta_{com}/\Delta u_d^i$ 中所有振荡模式所对应的留数,获取振荡模式 λ_i 对应频率的留数模值 $|R_i^i|$,并根据式(13)计算该直流对振荡模式 λ_i 的控制敏感因子 η_i^i 。

可以认为,控制敏感因子愈高的直流线路,愈宜作为附加直流控制器抑制振荡模式 λ_i 的输出作用点,即该直流线路是对于振荡模式 λ_i 的控制敏感点。

步骤 5: 若系统中存在多个弱阻尼振荡模式,可重复步骤 2、3,求得各振荡模式的控制敏感点,并生成最优控制策略表。

敏感点挖掘流程图如图 1 所示。

3 仿真实例分析

在某交直流系统里,从区域 [向外送出的直流一

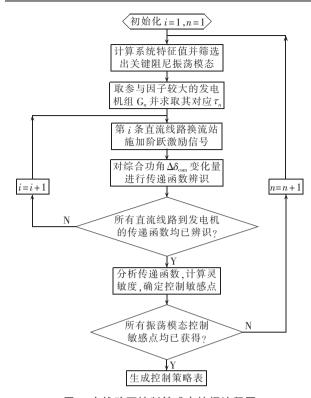


图 1 小扰动下控制敏感点挖掘流程图 Fig.1 Flowchart of controllability sensitive point digging for small disturbance

共有3条,正常情况下直流A向外额定输送3200 MW, 直流B向外额定输送2300 MW,直流C向外额定输 送750 MW,有3条重要交流联络线a、b、c将其与外 部电网连接,结构图如图2所示。

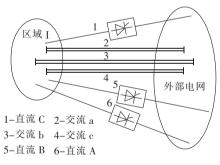


图 2 区域互联图

Fig.2 Interconnection of electrical areas

采用小干扰稳定分析工具进行计算,发现存在频率为 0.36 Hz 的区域间振荡模式,且该模式是系统的主导振荡模式,若不采取措施,会对系统的稳定造成很大的威胁。因此需要在 3 条直流中选出最佳控制点进行该模式的低频振荡抑制。本文采用前述的控制敏感点挖掘方法进行最佳直流控制点选择,其优劣排序遵循如下原则:在相同的阻尼效果下,直流调制输出量最小者即为最佳控制点,或者单位调制量下阻尼越大者即为最佳控制点。

根据小扰动程序的计算结果,按照参与因子的大小排序后,表1列出了区域I内10台发电机的信息,

经试验发现,从中选取前 6 台进行综合功角辨识得到结果与继续增加台数所辨识结果相差较小,因此最终选取前 6 台,即 p=6。 Δu_d^h 取直流 A、直流 B 和直流 C 有功功率变化。

表 1 强相关机组信息

Tab.1 Information of highly correlative generators

发电机 编号	动能 / (MW⋅s ⁻¹)	额定功率/ MW	惯性时间 常数/s	参与 因子
1	3000.2	667	8.9961	1
2	3 166.8	667	9.4957	0.8967
3	2680.7	600	8.9357	0.7260
4	3 2 4 8 . 2	649	10.0099	0.6006
5	3 168.3	667	9.6001	0.5612
6	3016.8	667	9.4777	0.5527
7	3573.8	889	8.0400	0.4302
8	1111.7	256	8.6852	0.2135
9	761.08	194	7.8462	0.1427
10	1 299	353	7.3598	0.1061

依据控制敏感点挖掘步骤,用矩阵束辨识[16]和式(13)计算得到的结果如表2所示。

表 2 矩阵束辨识结果及控制敏感因子 Tab.2 Result of matrix-pencil identification and controllability sensitivity factor

线路	振荡频率/Hz	留数	控制敏感因子
直流 A	0.73193	0.01018	0.424
	0.35230	0.00875	0.424
	0.16474	0.00171	0.424
直流 B	0.35883	0.00786	0.838
	0.17083	0.00152	0.838
直流 C	0.72354	0.00293	0.603
	0.35581	0.00670	0.603
	0.16852	0.00148	0.603

从表 2 可看出,发电机的综合功角曲线中在 3 条直流上加入扰动后,激发出的主要振荡频率均为 0.36 Hz 左右,但在不同直流上加扰动激发出的结果略有不同,3 条直流中控制敏感因子从大到小排序依次为直流 B、直流 C、直流 A。因此最佳控制点为直流 B,直流 C 次之,直流 A 最差。

为进一步验证所求的控制策略的正确性,进行如下仿真验证。为避免激发非线性环节,设置小扰动为:2s时刻,在区域I内的某交流线路处的首端发生单相短路故障,0.02s后在线路的两侧跳开,0.02s后单相短路故障消失,再经过0.02s,跳开的两侧重合并成功合上。在此基础上分别用3条直流进行小方式调制,其调制输入信号一致。然后将具有观测代表性的发电机 G₁ 的功角振荡情况与无调制时的振荡情况进行比较,如图3所示,辨识结果如表3所示。可见,有直流调制时阻尼得到了提高,且满足阻尼基本一致的前提。

图 4 为在相同的阻尼效果下,不同直流进行调制时直流输出功率的变化量,表 4 为对应不同直流功率



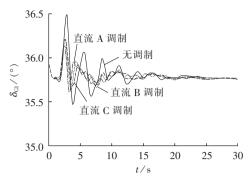


图 3 不同直流调制时发电机 G_1 的功角曲线 Fig.3 Power angle curve of G_1 for different DC modulations

表 3 发电机 G₁ 的功角曲线辨识结果 Tab.3 Results of power angle curve identification for G₁

调制对象	主振频率/Hz	阻尼比
无调制	0.3611	0.073
直流 A	0.3596	0.281
直流 B	0.3613	0.288
直流 C	0.3575	0.285

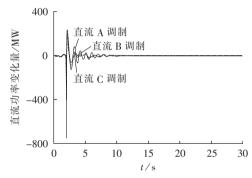


图 4 不同直流调制时各直流输出功率变化量 Fig.4 Power transmission variation of each DC line for different DC modulations

表 4 不同直流调制时各直流输出功率 变化量的最大值

Tab.4 Maximum power transmission variation of each DC line for different DC modulations

线路名称	功率变化量的最大值/MW
直流 A	247
直流 B	162
直流 С	182

变化量的最大值。可见,在相同阻尼效果前提下,不同直流进行调制时所用的调制量不同,三者从大到小排序依次为直流 A、直流 C、直流 B。这与所挖掘的控制策略一致,即直流 B 最佳,直流 C 次之,直流 A 最差,这就验证了挖掘的控制策略的正确性。

4 结语

针对抑制多直流系统中的低频振荡问题,本文是旨在可观选点确定后,在进行直流最佳可控选点时,考虑到经济原则,以减小达到相同阻尼效果时所需直流调制输出量为目标,并考虑发电机惯性时间常数和

不同模态对主振模态的影响,推导得到衡量直流可控点优劣的控制敏感因子指标,进而得到最优控制策略表。这种方法很好地计及了控制所花费的代价和所达到的阻尼效果,可为实际工程中在多直流的控制选点时提供有效参考。

参考文献:

- [1] PILOTTO L A S,SZECHTMAN M. Synchronizing and damping torque modulation controllers for multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3):1505-1513.
- [2] 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]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 32(5):98-101.
- [3] 付红军,潘励哲,林涛,等. 基于改进模拟植物生长算法的 PSS 与直流调制的协调优化[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):75-80
 - FU Hongjun, PAN Lizhe, LIN Tao, et al. Coordinative optimization of PSS and DC-modulation based on improved PGSA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):75-80.
- [4] 薛禹胜,郝思鹏,刘俊勇. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):1-8.
 - XUE Yusheng, HAO Sipeng, LIU Junyong. A review of analysis methods for low-frequency oscillations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3):1-8.
- [5] 赵睿,李兴源,刘天琪,等 抑制次同步和低频振荡的多通道直流 附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):89-93. ZHAO Rui,LI Xingyuan,LIU Tianqi,et al. Design of multichannel DC supplementary damping controller for sub-synchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):89-93.
- [6] 吴华坚,王渝红,李兴源,等. 基于综合性能指标的交直流混合系统直流调制研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(22):68-73. WU Huajian,WANG Yuhong,LI Xingyuan,et al. Study on DC modulation for AC/DC hybrid transmission system based on comprehensive performance index[J]. Power System Protection and Control,2010,38(22):68-73.
- [7] 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):53-58.
 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):53-58.
- [8] 孙勇, KARIMPOUR A, 牟晓明, 等. 采用 SVD 方法的附加阻尼控制器配置[J]. 高电压技术, 2009, 35(10):2575-2580.

 SUN Yong, KARIMPOUR A, MOU Xiaoming, et al. Allocation of supplementary damping controller using singular value decomposition method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):
- [9] 李兴源,陈凌云,颜泉,等. 多馈人高压直流输电系统非线性附加控制器的设计[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):16-20.

2575-2580.

LI Xingyuan, CHEN Lingyun, YAN Quan, et al. Design of nonlinear complementary controllers for multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 16-20



- [10] 李国庆,陈厚合,姜涛,等. 基于微分代数模型的直流非线性附加控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):34-38.
 - LI Guoqing, CHEN Houhe, JIANG Tao, et al. Nonlinear supplementary control of HVDC based on differential-algebraic model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6):34-38.
- [11] 郭利娜,刘天琪,程道卫,等. 直流多落点控制敏感点挖掘技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(10):7-12. GUO Lina,LIU Tianqi,CHENG Daowei,et al. Study on digging the most sensitive control point of multi-terminal HVDC system [J]. Power System Protection and Control,2013,41(10):7-12.
- [12] 王曦,李兴源,王渝红,等. 基于 TLS-ESPRIT 辨识的多直流控制 敏感点研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(19):121-125. WANG Xi,LI Xingyuan,WANG Yuhong,et al. Analysis controllability sensitive points of multi-HVDC system based on TLS-ESPRIT method[J]. Power System Protection and Control, 2012,40(19):121-125.
- [13] 王曦,王渝红,李兴源,等. 矩阵束辨识多直流系统控制敏感点[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(1);29-34. WANG Xi,WANG Yuhong,LI Xingyuan,et al. Controllability sensitive points of matrix pencil identification multi-HVDC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2013,25(1);29-34.
- [14] 陈厚合,姜涛,李国庆,等. 大区互联电网机组动态稳定性指标及应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):34-39.

- CHEN Houhe, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Dynamic stability index of generator and its application to interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 34-39.
- [15] 贺静波,李立涅,陈辉祥,等. 基于广域信息的电力系统阻尼控制器反馈信号选择[J]. 电力系统自动化,2007,31(9):6-10. HE Jingbo,LI Licheng,CHEN Huixiang,et al. Selection of feedback signal for power system damping controller based on wide area measurements [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(9):6-10.
- [16] CROW M L, SINGH A. The matrix pencil for power system modal extraction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1):501-502.

作者简介:



林 桥(1989-),男,四川资阳人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定与控制方面的研究(E-mail:linqiao19890820@sina.cn);

李兴源(1945-),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,IEEE高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电等方面的研究。

林桥

Sensitive point digging for additional damping control in multi-HVDC system

LIN Qiao, LI Xingyuan, WANG Xi, ZHAO Rui

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Additional damping control is an effective measure to suppress the low-frequency oscillation of HVDC system, but its effect and cost depend on the installation point in multi-HVDC system. For a certain damping effect, it is proposed to take the minimum DC output modulation as the objective for the installation point selection. An index named controllability sensitivity factor is deduced based on the linear system theory. The participation factor of each generator in a certain oscillation mode is calculated and the inertia time constants and power angles of the generators with bigger participation factors are processed to obtain the comprehensive power angle. Matrix-pencil identification is applied to determine the controllability sensitivity factor of each DC line to the main oscillation mode of the comprehensive power angle. An optimal control strategy is formed by sorting the controllability sensitivity factors of different DC lines. The DC line with the biggest controllability sensitivity factor is the most effective point for additional damping control. The simulative result for a multi-HVDC system illustrates the correctness of the obtained optimal control strategy.

Key words: DC power transmission; low-frequency oscillation; control; controllability sensitivity factor; DC modulation; stability; comprehensive power angle curve; matrix-pencil identification