

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.04.013

双通道高压直流附加频率极点配置控制器设计

朱显亮^{1,2}, 张英敏¹, 杨 兰², 李兴源¹, 褚正超¹, 郭 磊¹, 王渝红¹

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 国网浙江省电力公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021)

摘要: 为提高HVDC孤岛运行方式下的输电能力,同时抑制次同步振荡与低频振荡,提出了一种双通道附加频率极点配置控制策略。利用改进最小二乘旋转不变辨识算法,辨识出孤岛运行方式下系统低频与次同步振荡的开环传递函数。再利用系统的根轨迹图,通过调整系统的增益,可以初步得到一些使系统稳定的闭环极点,逐渐调整闭环极点的实部,得到期望的极点,以及观测器极点,然后利用带观测器的极点配置法,得到使系统稳定的控制器传递函数。为比较极点配置控制器的效果,设计了PID控制器与其进行对比。经过电磁暂态仿真软件Pscad仿真表明:该设计的极点配置控制器同时抑制孤岛运行方式下系统的低频与次同步振荡效果良好,改变运行方式,适应性较好,鲁棒性较PID控制器好;传统的PID控制器对系统的运行方式要求比较高,改变运行方式,效果变差,鲁棒性不好。因此,设计的极点配置控制器可以实现同时抑制HVDC孤岛运行方式下发生的低频与次同步振荡,有较好的鲁棒性,有一定的工程参考意义。

关键词: HVDC孤岛运行; 双通道; 观测器; 低频与次同步振荡; 极点配置控制器; 鲁棒性

Design of Dual Channel HVDC Additional Frequency Pole Assignment Controller

ZHU Xianliang^{1,2}, ZHANG Yingmin¹, YANG Lan², LI Xingyuan¹,
CHU Zhengchao¹, GUO Lei¹, WANG Yuhong¹

(1. School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Zhoushan Electric Power Supply Company of Zhejiang Power Corporation, Zhejiang Zhoushan 316021, China)

Abstract: This paper proposes a dual channel additional frequency pole assignment control strategy to improve the transmission capacity of HVDC under islanding operation, suppressing the subsynchronous oscillation and low frequency oscillation at the same time. Using the improved TLS-ESPRIT recognition algorithm, identifies the low frequency and subsynchronous oscillation open-loop transfer function of system under islanding. Then using the root locus diagram of system, by adjusting the gain of the system, can preliminarily get some closed-loop poles that makes the system stable, and gradually adjusting the real part of the closed-loop poles, achieves the desired pole as well as the observer poles, and then using the method of pole assignment with observer, gets the controller transfer function which makes the system stable. To compare the effect of pole assignment controller with other controller, the PID controller is designed to compare with it. By electromagnetic transient simulation software PSCAD simulation shows that the effect of pole assignment controller suppressing low frequency and subsynchronous oscillation at the same time of systems under islanding operation is good, and changing the operation mode, it has good adaptability, and the robustness is better than the PID controller; The traditional PID controller requires higher operation of the system, and changing the operation mode, the effect becomes worse than before, and the robustness is bad. Thus, the pole assignment controller designed by this paper can implement to suppress the low frequency and subsynchronous oscillation of HVDC at the same time under islanding operation mode, having good robustness,

收稿日期:2017-11-08; 修回日期:2018-01-08

基金项目:国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG001-027-2012)。

Project Supported by the Key Program of the State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG001-027-2012).

which has some reference value in engineering.

Key words: HVDC under islanding operation; dual channel; observer; low frequency and the subsynchronous oscillation; the pole assignment controller; robustness

0 引言

高压直流输电技术具有适合长距离、大容量输电的特点, HVDC的这一特点使得其在中国发展越来越广泛。在高压直流输电系统中, 如果送端系统基本只有若干发电厂与若干换流站组成, 则此系统极有可能孤岛运行。在中国“西电东送, 北电南送”的战略实施以来, 电力系统送端多直流输电的局面已经形成, 这种系统只有若干大型发电厂与送端换流站群构成, 因此极有可能孤岛运行^[1-4]。由于检修与故障等原因也有可能使电力系统转为孤岛运行^[5-9]。在孤岛运行方式下, 由于送端交流部分所占的比例减少, 造成系统的送端短路比减小, 一旦系统受到扰动, 如果不能及时的消除, 可能会引起更大的故障, 甚至造成整个电力系统失稳。因此, 研究电力系统孤岛运行的附加频率控制策略, 对于提高HVDC的稳定性具有较大的意义。

文[10-13]研究了电力系统的附加频率控制策略, 通过调整直流输送功率增强孤岛运行下送端系统抑制功率振荡的能力, 来提高系统的稳定性。文[10-11]利用PI控制方法, 通过快速调整送端功率, 提高系统的稳定性。但是PI控制器对运行方式比较敏感, 改变运行方式, 控制器的效果会变差, 即鲁棒性能不好。文[12]利用根轨迹法来实现孤岛运行方式下的控制, 但由于计算量比较大, 在系统中有低频与次同步振荡频率的情况下, 采用单通道, 不能实现比较好的效果。文[13]采用鲁棒控制法, 但由于采用单通道, 也不能比较好的同时抑制系统发生的低频与次同步振荡。

鉴于以上控制过程中出现的不足之处, 文中提出了一种双通道附加频率极点配置控制策略。虽然低频振荡与次同步振荡存在不同的物理机理, 但在线性条件下却可以辨识出不同模态的传递函数^[14-15], 实现同时控制。利用改进TLS-Esprit辨识算法, 辨识出孤岛运行模型低频与次同步振荡模态下的开环传递函数, 根据模型的根轨迹图, 调整增益可以初步得到一些使系统稳定的闭环极点, 逐渐调整闭环极点的实部, 得到期望的极点以及观测器极点, 然后利用带观测器的极点配置法得到双通道低频与次同步控制器。为显示控制器的优越性, 设计了PID控制器, 与其进行对比。在电磁暂态仿真软件

Pscad中仿真表明, 双通道极点配置控制器同时抑制孤岛运行低频与次同步振荡的效果良好, 改变运行方式, 适应性较好, 有较好的鲁棒性。PID控制器对运行方式比较敏感, 改变运行方式, 效果变差, 即鲁棒性不好。

1 TLS-Esprit 辨识原理

TLS-Esprit是一种高精度的辨识算法^[16-18]。相对于传统的Prony算法, 具有更强的抗噪声抗干扰能力, 因此辨识出来的传递函数更加精确。Esprit的主要部分是把采样得到的信号分为一些自相关与互相关矩阵, 然后单独为信号分配子空间, 计算出信号的旋转因子, 进而得到信号的衰减因子与频率, 最后结合TLS计算出信号的幅值与相位。TLS-Esprit辨识算法适合于大模型小扰动下的系统线性化模型辨识以及分析系统的振荡模态。

TLS-Esprit算法的具体步骤如下。

假设采样信号是由一系列正弦与白噪声信号组成, 则

$$z(n) = \sum_{i=1}^t c_i e^{(-\sigma_i + j\omega_i)nT_k} + \omega(n) \quad (1)$$

式(1)中: t 为采样信号实际含正弦量的2倍; T_k 为采样周期值; $c_i = r_i e^{j\theta_i}$; r_i 、 θ_i 、 σ_i 、 ω_i 分别为第 i 个振荡模态下的幅值、相位、衰减因子、角频率; $\omega(n)$ 为白噪声信号频率。

把采样数据构造成 *Hankel* 矩阵, 即

$$Z_{X \times Y} = \begin{bmatrix} z(0) & z(1) & \cdots & z(Y-1) \\ z(1) & z(2) & \cdots & z(Y) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z(X-1) & z(X) & \cdots & z(D-1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中: $X > t$; $Y > t$; $X + Y - 1 = D$ 。

分解 *Hankel* 矩阵, 则

$$Z = AUV^T \quad (3)$$

式(3)中: U 为对角矩阵; Γ 表示矩阵的共轭转置; 矩阵 V 按照自身的奇异值大小被分解为信号子空间 V_s 以及噪声子空间 V_N 。矩阵 Z 幅值最大的 t 个奇异值的特征向量为矩阵 V_s 的列向量。

假设 V_s 去掉最后一行的矩阵为 V_1 , V_s 去掉最后一行的矩阵为 V_2 。再分解由 V_1 、 V_2 构成的矩阵为

$$[V_1, V_2] = AAB^T \quad (4)$$

式(4)中, $B \in \mathbb{C}^{2l \times 2l}$, B 被分解为 4 个 $l \times l$ 矩阵, 即

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \tag{5}$$

由 $(-B_{12}B_{22}^{-1})$ 的特征根 $\gamma_i (i=1, 2, \cdots, l)$, 可求得采样信号各分量的频率、阻尼比、衰减因子为

$$\omega_i = \frac{\arg \gamma_i}{T_1} \tag{6}$$

$$s_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \tag{7}$$

$$G_1(s) = \frac{-0.071\,49\,s^8 + 0.189\,2\,s^7 + 0.846\,3\,s^6 - 103.1\,s^5 + 430.3\,s^4 - 6\,236\,s^3 + (1.048 \times 10^4)s^2 - (1.541 \times 10^4)s}{s^8 + 3.535\,s^7 + 119.9\,s^6 + 326.5\,s^5 + 4878\,s^4 + 8794\,s^3 + (7.857 \times 10^4)s^2 + (7.251 \times 10^4)s + (4.143 \times 10^5)} \tag{9}$$

次同步振荡频率, 辨识得到次同步振荡模态的开环 传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{0.035\,89\,s^4 - 11.39\,s^3 + 991.2\,s^2 - (2.57 \times 10^5)s}{s^4 + 2.589\,s^3 + (4.727 \times 10^4)s^2 + (6.121 \times 10^4)s + (5.587 \times 10^8)} \tag{10}$$

2 孤岛运行模型分析

2.1 系统振荡分析

孤岛运行方式, 直流功率降至 25%(1 600 MW) 单极运行, W 与 H 电厂各开 2 台 600 MW 的发电机, D 电厂只开一台 600 MW 的发电机, 由于事故检修等原因, 导致与节点 A、C 连接的主网与 500 kV 双回路高压交流线路断开。利用机组系数法对直流系统孤岛运行方式下引发的次同步振荡进行风险评估^[9]。机组作用系数(UIF)计算结果见表 1。

表 1 机组 UIF 计算结果

Table 1 The UIF calculation results of generators

电厂名称	电厂出力/MW	UIF
W 电厂	2×600	0.105
D 电厂(500 kV)	1×600	0.108
H 电厂	2×600	0.067

由表 1 可知, 孤岛运行方式下, 电厂 W 与 D 的机组作用系数大于 0.1。加大了相关电厂与换流站 B 之间的相互作用, 加大了引发交直流电网引发次同步振荡的风险。

2.2 系统模型分析

在电磁暂态仿真软件 Pscad 中搭建模型时, 主要考虑 500 kV 线路, 对 220 kV 线路和负荷进行适当的等值处理。直流系统拓扑结构见图 1。

利用辨识出来的传递函数的根轨迹图, 得到低频与次同步振荡模式下的频率与阻尼比见表 2。

由表 2 可知, 孤岛运行方式直流功率降至 25%(1 600 MW)单极运行时, 系统低频振荡与次同步振荡并存, 低频振荡通常为交流大区域间功率振荡; 其中 0.74 Hz 与 1.16 Hz 为低频振荡模式, 阻尼比为

$$\sigma_i = -\frac{\ln|\lambda_i|}{T_1} \tag{8}$$

在孤岛运行系统进入稳定运行以后, 通过在整流侧直流定电流处添加小幅扰动取得信号 f_1 , 然后在未添加扰动时取得信号 f_2 , 两者再做差 $\Delta f = f_1 - f_2$, 根据以上介绍的最小二乘旋转不变辨识算法(TLS-Esprit), 通过平衡降阶法降阶, 保留模型的主要低频振荡频率, 辨识得到低频振荡模态的开环传递函数为。

同理, 通过平衡降阶法降阶, 保留模型的主要

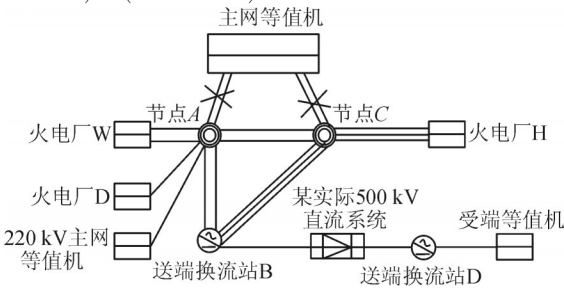


图 1 系统模型结构图

Fig. 1 The system model structure chart

表 2 次同步与低频振荡参数

Table 2 The subsynchronous and low frequency oscillation parameters

振荡模态	频率/Hz	阻尼比/%
低频振荡 1	0.74	2.040
低频振荡 2	1.16	0.630
次同步振荡	24.50	0.068

弱阻尼, 造成系统低频振荡严重。24.5 Hz 为次同步振荡模式, 阻尼比接近于零, 造成系统轴系扭曲严重, 次同步振荡强烈。

3 控制器设计

3.1 双通道结构介绍

由于设计出的双通道控制器可能在抑制自身振荡频率时为自身提供正阻尼, 而可能会对其它振荡模态提供负阻尼, 这样会造成控制器之间发生相互耦合作用, 从而降低控制器的效果。为解决此类问题, 在双通道控制器通道中添加带通滤波器, 这样使控制器可以在各自的通道中定位运行, 有效的减少了控制器之间的相互耦合作用, 从而使控制器共同起作用, 同时抑制低频与次同步振荡, 双通道极点配置控制器结构见图 2。

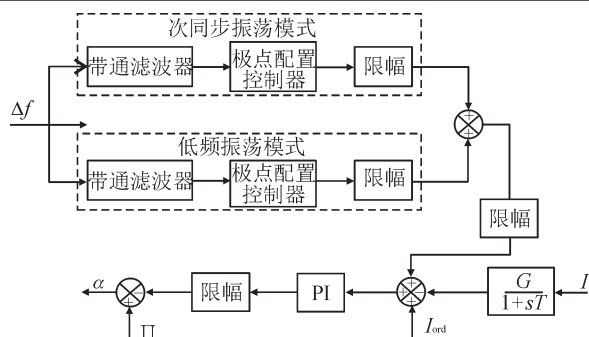


图2 双通道附加频率极点配置控制器结构图

Fig. 2 The dual channel additional frequency pole assignment controller structure chart

3.2 系统跟轨迹图分析

在MATLAB中绘制出低频振荡模态根轨迹图见图3。

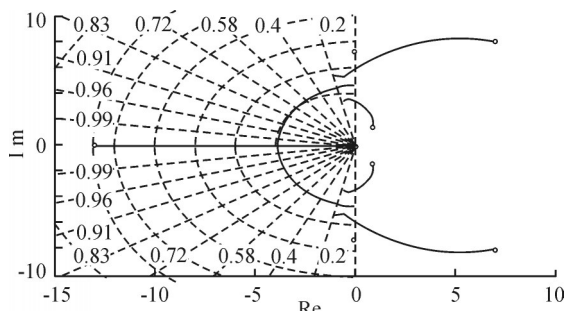


图3 系统低频振荡开环根轨迹图

Fig. 3 The low frequency oscillation open-loop root locus diagram of system

由系统的根轨迹图可知,当开环增益在一定范围内变化,系统是稳定的,调整系统的增益,可以得到一些使系统稳定的闭环极点。开环增益 $K_1 = 0.0287$ 时,通过引入负反馈,可以得到系统的闭环极点 $s_{1,2} = -0.0445 \pm 7.27i$, $s_{3,4} = -0.4780 \pm 4.67i$, $s_{5,6} = -0.7450 \pm 5.23i$, $s_{7,8} = -0.4930 \pm 3.53i$,此时可以使系统稳定下来。由于此时的纯增益相当于PID控制器,PID控制器对系统的运行方式比较敏感,改变运行方式,有可能会失去作用。为了减少这一不足之处,利用极点配置法来重新设计控制器。改进上述极点的实部,使上述极点的实部的绝对值扩大2倍,虚部不变,得到控制器的期望极点。把上述系统闭环极点的实部的绝对值扩大5倍,虚部不变,得到观测器极点。引入观测期的好处是可以减少极点配置过程中的工作量,同时又可以保证控制器较好的鲁棒性。利用带观测器的极点配置法,处理上述期望极点以及观测器极点,得到极点配置控制器。

同理,针对24.50 Hz的次同步振荡频率,也按照上述方法最终得到极点配置控制器。

3.3 带观测器的极点配置控制原理

假如控制系统特征方程^[20]为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (11)$$

$$\dot{y} = Cx + Du \quad (12)$$

取HVDC系统控制信号为

$$u = -Kx \quad (13)$$

式(3)中, K 为状态反馈增益矩阵。

假设系统是状态完全可控的,将控制信号 u 代入式(11)中得

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (14)$$

现在定义 $N = A - BK$, 则所期望的特征方程为

$$|sI - A + BK| = |sI - N| = (s - \mu_1)(s - \mu_2) \cdots (s - \mu_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \cdots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0 \quad (15)$$

由于凯来-哈密尔顿定理(Cayley-Camilton)阐明 N 应满足其自身的特征方程,所以

$$\varphi(N) = N^n + \alpha_1 N^{n-1} + \cdots + \alpha_{n-1} N + \alpha_n I = 0 \quad (16)$$

利用式(16)可得确定状态反馈的增益矩阵 K 的爱克曼(Ackermann)方程为

$$K = [0 \quad \cdots \quad 0 \quad 1] [B \quad AB \quad \cdots \quad A^{n-1}B]^{-1} \varphi(A) \quad (17)$$

根据上述根轨迹图得到系统闭环传递函数的期望极点。把期望极点代入式(15)中,解爱克曼方程(17),就可以得到使矩阵 $A - BK$ 逐渐稳定的状态反馈矩阵 K 。

由于系统的真实状态无法准确测量,所以引入观测器,将观测到的状态再次用于反馈。这样,在节省工作的同时,还能保证系统的可控性。从而设计出带观测器的极点配置控制器^[21]。基于极点配置的状态-观测反馈控制系统见图4。

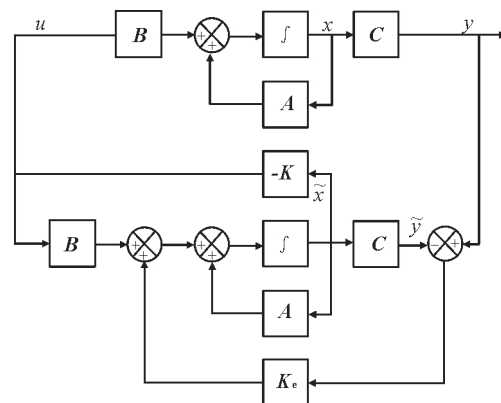


图4 基于极点配置的状态-观测反馈控制系统

Fig. 4 The observations-state feedback control system based on pole assignment

图4中: x 为系统真实的状态变量; y 为系统输出值; $\hat{x}$ 为观测器估计状态变量; $\hat{y}$ 为观测器输出; K 为通过解方程(7)所得的状态反馈增益矩阵; K_e 为

观测器增益矩阵。通过图4可以得到观测器状态方程, 通过以上根轨迹图得到的观测器极点代入式(7)可得到使矩阵 $A - BK_e$ 逐渐稳定的状态反馈矩阵 K_e 。一般要使观测器极点比控制器极点快2~5倍得到合适的观测器增益值。使观测器误差快速收敛到零。

3.4 控制器参数设计

根据文3.2及3.3介绍的控制器设计方法, 以送

端电厂W的附加频率偏差为输入, 附加电流信号为输出, 通过快速调整送端功率, 进而调整系统恢复稳定。控制器安装在送端整流侧直流定电流处。根据上述所配置的低频期望极点与低频观测器极点设计出低频振荡极点配置控制器为

根据上述所配置的次同步期望极点与次同步观测器极点设计出次同步振荡极点配置控制器为

设计完极点配置控制器以后, 为了显示极点配

(18)

$$K_g(s) = \frac{-129.9s^3 + 3579s^2 - 3.061 \times 10^6s + (9.712 \times 10^7)}{s^4 + 79.54s^3 + (5.134 \times 10^4)s^2 + (1.983 \times 10^6)s + (5.674 \times 10^8)} \quad (19)$$

置控制器效果的优越性。根据辨识出来的开环传递函数 $G_1(s)$ 与 $G_2(s)$ 根轨迹图, 最终设计出纯增益PID控制器与极点配置控制器进行对比。PID控制器的参数为 $K_{1PID} = -0.024$ 、 $K_{2PID} = -0.02$ 。PID控制器的限幅与带通滤波器参数与极点配置控制器相同, PID控制器安装在整流侧直流定电流处, 其结构见图5。

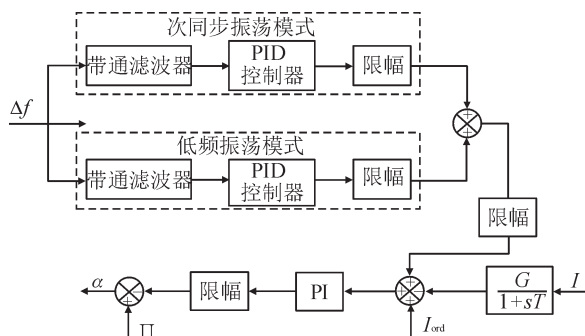


图5 多通道附加频率PID控制器结构图

Fig. 5 The dual channel additional frequency PID controller structure chart

4 仿真验证

设计好控制器以后, 分别把极点配置控制器 $K_d(s)$ 、 $K_g(s)$ 安装到图2所示的结构中, 控制器在各自的通道中定位运行。把设计好的PID控制器 K_{1PID} 、 K_{2PID} 安装到图5所示的结构中, PID控制器在各自的通道中定位运行。然后给系统添加阶跃扰动与单相接地短路故障扰动, 在电磁暂态仿真软件Pscad进行仿真, 取W电厂的频率偏差来观测, 得图6-11。

4.1 扰动1

1 s时在整流侧直流定电流处添加0.02倍阶跃扰动, 使系统的频率上升到1.02 p.u., 在电磁暂态仿真软件Pscad中仿真, 得到送端交流侧W电厂的低频振荡模态图, 即图6。得到送端交流侧W电厂的次同步振荡24.5 Hz的振荡模态图, 即图7。得到送

端交流侧W电厂的仿真总图, 即图8。

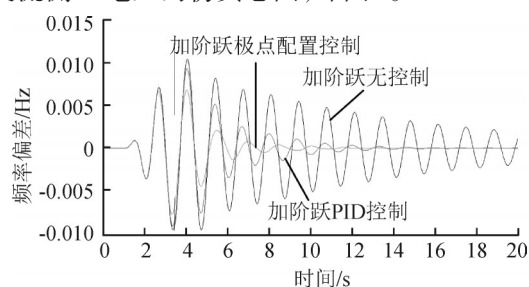


图6 低频振荡对比图

Fig. 6 The low frequency oscillation comparison chart

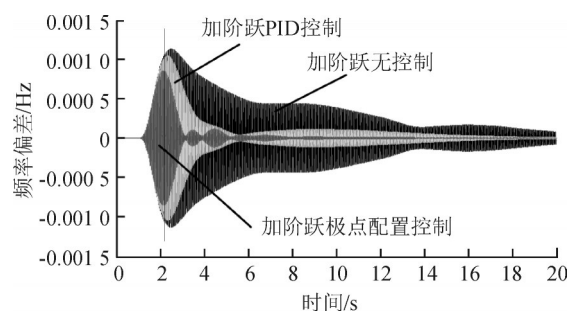


图7 次同步振荡对比图

Fig. 7 The subsynchronous oscillation comparison chart

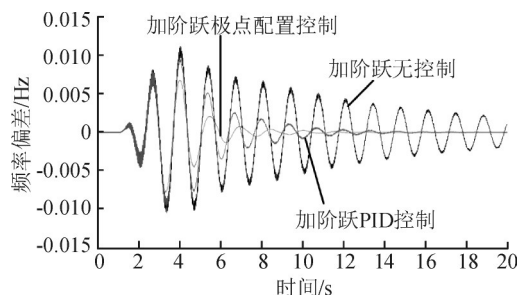


图8 HVDC孤岛运行振荡对比图

Fig. 8 The HVDC oscillation comparison chart under islanding operation

通过图6-8可知, 极点配置控制器同时抑制孤岛运行方式下的低频与次同步振荡效果良好, 而PID控制器也有一定的效果, 但从仿真图中可以得

出,其效果没有极点配置控制器效果好。

4.2 扰动2

1 s时送端交流侧高压母线发生单相接地短路故障,0.02 s后故障消失。通过在电磁暂态仿真软件Pscad中仿真可得到送端交流侧W电厂的低频振荡模态图,即图9。得到送端交流侧W电厂的次同步振荡24.5 Hz的振荡模态图,即图10。得到送端交流侧W电厂的仿真总图,即图11。

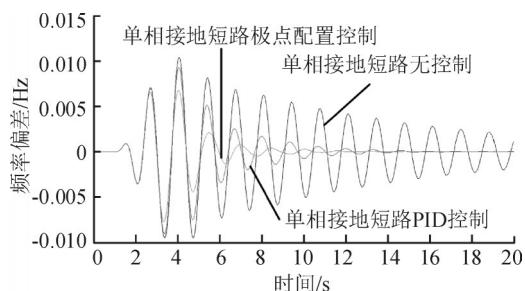


图9 低频振荡对比图

Fig. 9 The low frequency oscillation comparison chart

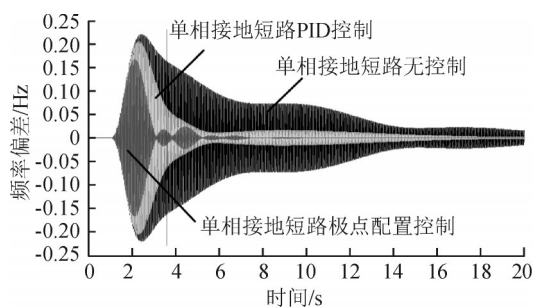


图10 次同步振荡对比图

Fig. 10 The subsynchronous oscillation comparison chart

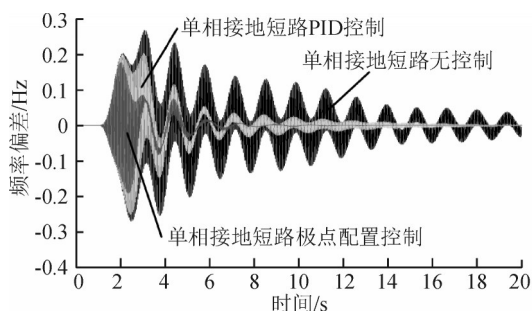


图11 HVDC孤岛运行振荡对比图

Fig. 11 The HVDC oscillation comparison chart under islanding operation

通过图9-11可知,极点配置控制器可以较好的抑制系统发生的低频与次同步振荡,结合图6-8可以得出,改变运行方式,极点配置控制效果依然比较好,即适应性比较好,有较好的鲁棒性。而通过图9-11可以得出,PID控制器也可以控制孤岛运行方式下系统发生的低频与次同步振荡,但与极点配置控制器比较起来,效果不好,结合图6-8可以得出,PID控制器的效果变差了,这是由于PID控制器

是在线性化条件下设计出来的,添加单相接地短路以后模型的运行方式发生了变化,所以PID控制器控制效果降低。而极点配置控制器对运行方式不敏感,通过图6-11可知,改变系统运行方式,极点配置控制器效果依然比较好。

5 结语

文中对于HVDC孤岛运行方式下引发的低频与次同步振荡问题,提出了一种双通道附加频率极点配置控制策略。通过TLS-Esprit辨识出系统低频与次同步振荡的开环传递函数,然后根据开环传递函数的根轨迹图,调整开环增益,通过引入负反馈可以初步得到使系统快速稳定的闭环极点,然后逐渐放大闭环极点的实部绝对值的倍数,得到期望极点以及观测器极点,通过带观测器的极点配置法得到系统的极点配置控制器。引入观测器减少工作量的同时又保证了控制器较好的鲁棒性。为了显示极点配置控制器的优越性,设计了PID控制器与其进行对比。通过电磁暂态仿真软件Pscad仿真表明,文中设计的极点配置控制器克服了PID控制器对运行方式适应性比较差的缺点,同时抑制孤岛运行方式下的低频与次同步振荡效果良好,有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 李保宏,张英敏,李兴源,等.多通道高压直流附加鲁棒控制器设计[J].电网技术,2014,38(4):858-864.
LI Baohong, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, et al. Design of multi-channel additional robust controller for HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 858-864.
- [2] 王华伟,韩民晓,雷霄,等.呼辽直流孤岛运行方式下送端频率特性及控制策略[J].电网技术,2013,37(5):1401-1406.
WANG Huawei, HAN Minxiao, LEI Xiao, et al. Sending end frequency characteristics under island operation mode of HVDC transmission system from Hulunbuir to Liaoning and corresponding control strategy[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1401-1406.
- [3] 贺静波,张剑云,李明节,等.直流孤岛系统调速器稳定问题的频域分析与控制方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16):137-143.
HE Jingbo, ZHANG Jianyun, LI Mingjie, et al. Frequency domain analysis and control for governor stability problem in island HVDC sending systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 137-143.

- [4] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [5] 陈亦平, 程 哲, 张 昆, 等. 高压直流输电系统孤岛运行调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 96-102.
CHEN Yiping, CHENG Zhe, ZHANG Kun, et al. Frequency regulation strategy for islanding operation of HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 96-102.
- [6] 赵 良, 覃 琴, 郭 强, 等. 中蒙直流输电工程送端孤岛频率控制问题[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 22-25.
ZHAO Liang, QIN Qin, GUO Qiang, et al. Frequency control for islanded system at sending terminal of HVDC power transmission from China to Mongolia[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 22-25.
- [7] 徐 政. 交直流动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
XU Zheng. AC/DC dynamic behavior analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [8] 梁旭明, 张 平, 常 勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [9] 李兴源, 赵 睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [10] 李亚男, 马为民, 殷威扬, 等. 向家坝—上海特高压直流系统孤岛运行方式[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 185-189.
LI Yanan, MA Weiming, YIN Weiyang, et al. Island operation modes XS800 UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 185-189.
- [11] 马玉龙, 石 岩, 殷威扬, 等. HVDC 送端孤岛运行方式的附加控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 22-25.
MA Yulong, SHI Yan, YIN Weiyang, et al. Additional control strategy for island AC system at sending terminal of HVDC[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 22-25.
- [12] 魏 亮, 王渝红, 李兴源, 等. 高压直流输电送端孤岛运行附加频率控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2015, 36(1): 143-148.
WEI Liang, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Design of additional frequency controller for islanded sending-end operation of HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 36(1): 143-148.
- [13] 汤 华, 王渝红, 魏 亮, 等. HVDC 孤岛运行附加频率鲁棒控制器设计[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 1-7.
TANG Hua, WANG Yuhong, WEI Liang, et al. An additional frequency robust controller for HVDC transmission system under islanding operation[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 1-7.
- [14] 胡云花, 赵书强, 马燕峰, 等. 电力系统低频振荡和次同步振荡统一模型阻尼分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(7): 6-11.
HU Yunhua, ZHAO Shuqiang, MA Yanfeng, et al. Damping analysis of unified LFO&SSO model in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(7): 6-11.
- [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: 304-309.
NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Theory and analysis of dynamic power system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 304-309.
- [16] 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 on controllability sensitive points of multi-HVDC systems based on TLS-ESPRIT method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 121-125.
- [17] ZHANG Y, BOSE A. Design of wide-area damping controllers for interarea oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1136-1143.
- [18] 徐遐龄, 林 涛, 张 帆, 等. 基于 TLS-Esprit 的低频振荡负荷参与程度量化分析[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 109-113.
XU Xialing, LIN Tao, ZHANG Fan, et al. TLS-Esprit based quantitative analysis on participating degree of load in low-frequency oscillation[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 109-113.
- [19] 赵 睿, 李兴源, 刘天琪, 等. 抑制次同步振荡和低频振荡的多通道附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统自动化设备, 2014, 34(3): 89-92.
ZHAO Rui, LI Xingyuan, LIU Tianqi, et al. Design of multi-channel DC supplementary damping controller for sub-synchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 89-92.
- [20] KATSUHI O. 现代控制工程[M]. 第4版. 卢伯英, 于海勋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 773-774.
KATSUHI O. Modern control engineering[M]. 4th ed. LU Boying, YU Haixun, translation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 773-774.
- [21] 李天云, 张志华, 陈 峰, 等. 基于扩张状态观测器和 Terminal 滑模的 HVDC 非线性鲁棒控制器设计[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 190-195.
LI Tianyun, ZHANG Zhihua, CHEN Feng, et al. Design of nonlinear robust controller of HVDC power transmission system based on extended state observer and terminal sliding mode control[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 190-195.

- 版), 2014, 42(9): 102-106.
- HUANG Min, GUO Qianwen, TONG Chongli, et al. Mechanism analysis of DC-bias increasing the risk of commutation failure[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology(Nature Science Edition), 2014, 42(9): 102-106.
- [14] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.
- HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [15] 朱韬析, 王 超. 天广直流输电系统换相失败的分析及处理[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1769-1773.
- ZHU Taoxi, WANG Chao. Analysis and recovery of commutation failure in Tian-Guang HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1769-1773.
- [16] 刘 鹏, 郭倩雯, 杨 铭, 等. 抗直流偏磁的变压器中性点接地方式探讨[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 794-799.
- LIU Peng, GUO Qianwen, YANG Ming, et al. Discussion about neutral point connection mode of transformer to inhibit DC bias[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 794-799.
- [17] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.
- ZHU Yiyang, JIANG Weiping, ZENG Zhaohua, et al. Study on measures of restraining DC current through transformer neutrals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 1-7.
- [18] 陈 浩, 李 琳, 许正梅. 换流变压器铁心饱和型不稳定性预测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 108-113.
- CHEN Hao, LI Lin, XU Zhengmei. Prediction of coresaturation instability at converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 108-113.
- [19] 王 峰, 刘天琪, 周胜军, 等. 谐波对HVDC系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4888-4894.
- WANG Feng, LIU Tianqi, ZHOU Shengjun, et al. Mechanism and quantitative analysis method for HVDC commutation failure resulting from harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4888-4894.
- [20] 梁松涛. 特高压直流输电换相失败特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- LIANG Songtao. Study on phase-change failure of UHV DC transmission[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.

常 鹏(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电。

(上接第93页)

(10): 190-195.

朱显亮(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。

张英敏(1974—), 女, 副教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制。

杨 兰(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与稳定控制。

李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、新能源并网方式。