

高压直流输电送端孤岛运行附加频率控制器设计

魏亮,王渝红,李兴源,黎东祥,刘霄涵,汤华

(四川大学电气信息学院,四川成都 610065)

摘要: 高压直流输电系统在孤岛运行方式下,由于缺少负荷的频率调节效应,交、直流系统的扰动极易造成送端系统频率的不稳定。采用 TLS-ESPRIT 算法辨识出某实际电网系统的传递函数,并根据根轨迹校正原则设计了一种直流系统附加频率控制器,利用直流输电系统功率的快速可控性,来稳定送端系统频率。同时,设计了传统比例积分控制器与所提控制器进行比较。在 PSCAD/EMTDC 中仿真结果表明,所设计的频率附加控制器可以有效地提高孤岛系统的频率稳定性。

关键词: 高压直流输电; 孤岛运行; 频率稳定; 根轨迹校正; 附加频率控制

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.021

0 引言

由于高压直流输电(high voltage direct current transmission)系统在大容量远距离送电、非同步联网等方面的巨大优越性,其在实际工程中的应用越来越广泛^[1-4]。若高压直流输电的送端系统基本只由若干个大型电厂与送端换流站群联接构成,则称之为孤岛运行^[4]。在这种孤岛运行方式下,系统的短路比较小,交、直流系统的扰动极有可能引起系统功率的持续不平衡,进而导致送端系统频率的不稳定,一旦控制不当,就会引起连锁故障,甚至造成孤岛系统的崩溃。所以,针对直流系统孤岛运行方式,研究直流附加频率控制器具有重要意义。

文献[5-9]表明附加频率控制器的合理设计可以增强送端孤岛系统抑制系统功率波动的能力,提高孤岛系统的频率稳定性。但是,文献[5-6]中的控制器是多模块级联结构,控制器各模块参数根据经验整定,控制效果一般;文献[7-9]中的控制器是PI控制器,控制器参数采用试凑法校正,参数整定需要一定的经验和技巧。上述2种控制器参数的整定皆具有一定的盲目性且控制效果一般,不利于工程实际应用。

针对上述研究的不足,本文利用先进控制理论的辨识方法通过对非线性时域仿真数据的分析直接计算出系统精确的低阶线性化模型,并依据根轨迹校正原则设计了直流附加频率控制器,有效地避免了控制器参数整定的盲目性。同时,设计了传统PI控制器进行比较。在PSCAD/EMTDC中的数字仿真

实验表明,所设计的控制器可以有效地抑制系统频率波动,提高送端系统频率稳定性。研究结果可为孤岛运行方式下的系统运行提供参考。

1 孤岛系统模型

1.1 仿真模型

基于PSCAD/EMTDC所搭建的某实际电网仿真系统网络结构如图1所示。在搭建电磁暂态模型时,主要考虑电厂和换流站间相连的330 kV线路,对于750 kV的外送线路和负荷进行适当的等值处理。系统中电厂A、电厂B及电厂C均由2台汽轮发电机构成,其中电厂A和电厂B中每台发电机的容量为660 MW,电厂C中每台发电机的容量为330 MW。正常运行方式下,直流系统的控制方式为整流侧定电流控制、逆变侧定熄弧角控制。

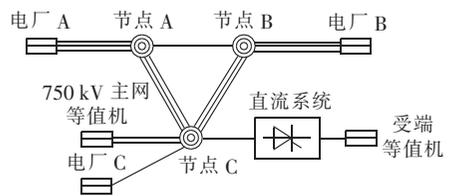


图1 某实际电网仿真系统网络结构

Fig.1 Structure of simulation system for a real power system

正常运行方式下,所有电厂机组满发,直流系统的额定传输功率为3000 MW。此时,直流系统的换流站交流母线与送端交流主网存在电气联系。如果发生N-2故障导致换流母线与送端750 kV交流主网的交流联络线断开,则系统的送端交流系统将只包括电厂A、电厂B和电厂C中的6台发电机,形成电气关系上的孤岛运行。图1系统在孤岛运行时的短路比为:

$$SCR = \frac{S_{sc}}{P_{dN}} = 2.436 \quad (1)$$

其中, S_{sc} 为换流母线短路容量; P_{dN} 为直流额定功率。

收稿日期:2015-02-27;修回日期:2015-10-23

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51037003);国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001-027-2012) Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51037003) and the State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG001-027-2012)

可知,直流系统在孤岛运行方式下,当其输送功率较大时,送端交流系统的 SCR 较小,属于较弱的交流系统^[8]。当交、直流系统存在扰动或故障等情况时,孤岛系统有功功率将难以平衡,进而导致送端系统频率的不稳定,给系统的稳定运行带来极大的风险。

1.2 基于 TLS-ESPRIT 算法的系统辨识

TLS-ESPRIT 算法是一种基于线性化近似的高精度信号分析方法。与传统辨识算法相比,TLS-ESPRIT 算法具有抗噪抗干扰能力更强、计算量更少、模态参数辨识精度更高的优点^[10-12]。ESPRIT 算法的关键是通过采样数据形成自相关矩阵和互相关矩阵计算出信号的旋转因子,通过旋转因子从而求出信号的频率和衰减因子,然后结合最小二乘法即可求出信号的幅值与相位^[13-14]。TLS-ESPRIT 算法具体步骤如下。

设采样信号 $x(n)$ 可以表示为一系列正弦信号与白噪声的组合:

$$x(n) = \sum_{k=1}^P c_k e^{(-\sigma_k + j\omega_k)nT_s} + w(n) \quad (2)$$

其中, T_s 为采样周期; P 的取值为信号实际含有的实正弦分量个数的 2 倍; $c_k = a_k e^{j\theta_k}$; a_k 、 θ_k 、 σ_k 、 ω_k 分别为第 k 个振荡模式的幅值、相位、衰减因子和角频率; $w(n)$ 为白噪声。

采集数据形成如下 Hankel 矩阵:

$$X_{L \times M} = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \cdots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \cdots & x(M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(L-1) & x(L) & \cdots & x(N-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $L > P$, $M > P$, $L + M - 1 = N$ 。

奇异值分解 Hankel 矩阵:

$$X = U \Lambda V^H \quad (4)$$

将矩阵 X 的奇异值作为对角元素按大小排列形成对角阵 Λ , 将矩阵 V 按奇异值的大小划分成信号子空间 V_S 和噪声子空间 V_N , 上标 H 表示共轭转置。矩阵 X 的幅值最大的 P 个奇异值的特征向量即为信号子空间 V_S 的列向量。

设 V_1 表示 V_S 去掉最后一行后所剩的矩阵, V_2 表示 V_S 去掉第一行以后所剩的矩阵, 暂不考虑噪声和其他干扰, 存在可逆矩阵 Ψ , 使得:

$$V_2 = V_1 \Psi \quad (5)$$

其中, Ψ 为旋转算子, 由 Ψ 可得到信号参数。

考虑到测量噪声及干扰误差等因素, V_1 、 V_2 分别存在误差 E_1 、 E_2 , 因而有:

$$V_2 + E_2 = (V_1 + E_1) \Psi \quad (6)$$

对 Ψ 寻优以满足式(5), 并且使误差矩阵 $E = [E_1, E_2]$ 的 Frobenius 范数 $\|E\|_F = \sqrt{\sum \sum E_{ij}^2}$ 最小。引入最小二乘法, 对 $[V_1, V_2]$ 进行奇异值分解。

$$[V_1, V_2] = QAR^H \quad (7)$$

其中, $R \in C^{2P \times 2P}$, 将 R 分成 4 个 $P \times P$ 的矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

计算 $(-R_{12}R_{22}^{-1})$ 的特征根 $\lambda_k (k=1, 2, \dots, P)$, 从而可知信号中各分量的频率、衰减因子和阻尼比分别为:

$$\begin{cases} \omega_k = \frac{\arg \lambda_k}{T_s} \\ \sigma_k = -\frac{\ln |\lambda_k|}{T_s} \\ \zeta_k = \frac{\sigma_k}{\sqrt{\sigma_k^2 + \omega_k^2}} \end{cases} \quad (9)$$

进一步采用最小二乘法计算出幅值和初始相位。考察 N 点采样信号, 有:

$$Y = \Lambda C \quad (10)$$

$$Y = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T \quad (11)$$

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_k, \dots, c_P]^T \quad (12)$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_P \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_P^{N-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

用最小二乘法求解方程(10)可得:

$$C = (\Lambda^H \Lambda)^{-1} \Lambda^H Y \quad (14)$$

从而, 信号中各个分量的幅值和相位分别为:

$$a_k = 2 |c_k| \quad (15)$$

$$\theta_k = \arg c_k \quad (16)$$

为了辨识系统模型, 在孤岛系统进入稳态运行后, 对其施加不影响系统线性化条件的小幅值扰动。以直流系统整流侧定电流控制信号的低幅值阶跃扰动为输入, 送端交流系统频率偏差为输出。首先采集系统稳态运行时, 送端交流系统频率信号数据 X_1 ; 然后, 在同一采样时间范围内, 采集施加低幅值阶跃扰动后送端交流系统频率信号数据 X_2 ; 以阶跃响应数据 $X = X_2 - X_1$ 为待辨识信号按照上述 TLS-ESPRIT 算法步骤进行数据辨识, 辨识出系统阶跃响应的时域表达式。进而求得包含系统最主要几个模态的系统低阶线性化模型 $G(s)$ 。

$$G(s) = (0.8048s^6 + 4.998s^5 + 59.59s^4 + 209.9s^3 + 1045s^2 + 819.3s) / (s^6 + 1.047s^5 + 106.5s^4 + 80.21s^3 + 3565s^2 + 1526s + 36440) \quad (17)$$

2 附加频率控制器设计

由于缺乏负荷的频率调节效应, 孤岛系统的频率的稳定性远远低于联网系统^[15]。送端系统在扰动、故障等情况下的系统有功功率不平衡是导致系统频率稳定被破坏的根本原因^[16]。因此, 利用直流系统快速可控的优点, 消除或减小发电机组输出功率与直流系统传输功率间的不平衡将是一种行之有效的解决

办法^[5]。

2.1 控制器结构

为了消除发电机组输出功率与直流系统传输功率间的不平衡,需要引入频率附加控制环节。即在交流系统因扰动或故障造成系统频率波动时,将系统频率偏差作为附加控制器的输入信号,将附加电流控制信号作为控制器输出信号,调整直流系统输送功率,抑制送端系统有功功率偏差,阻尼系统频率波动^[4]。控制器设置在直流系统整流侧定电流控制处,其结构如图 2 所示。

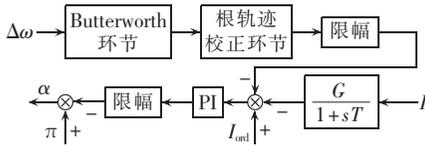


图 2 直流系统频率限制器结构

Fig.2 Structure of DC system frequency limiter

其中,Butterworth 环节为低通滤波器,滤除高频干扰信号,其截止频率为 60 Hz;根轨迹校正环节根据系统传递函数确定;限幅环节确定直流电流调节量的下限和上限,分别设定为-0.2 和 0.2。

2.2 控制器参数整定

用根轨迹法进行校正是建立在改变系统原有根轨迹的基础上的^[17-19],即通过在系统开环传递函数中增加极点和零点,迫使根轨迹经过 s 平面内所希望的闭环极点的一种方法^[5]。为了方便计算,采用串联校正方法,设加入控制器后的闭环系统方框图如图 3 所示。其中 $G(s)$ 为辨识出的系统传递函数, $G_c(s)$ 为校正环节传递函数。

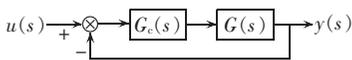


图 3 串联校正系统

Fig.3 Series correction system

加入校正环节后,系统的传递函数为:

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1+G_c(s)G(s)} \quad (18)$$

校正前系统的根轨迹图如图 4 所示。

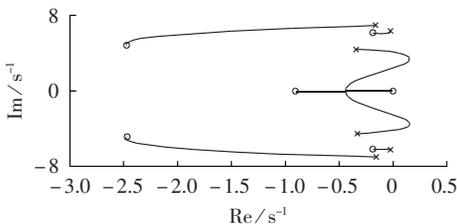


图 4 系统根轨迹图

Fig.4 Root-locus plot of system

由图 4 可知,校正之前系统的开环极点均位于虚轴左侧且靠近虚轴处。说明系统虽然稳定,但是受到扰动后容易引发振荡。为了使系统具有较好的响

应特性,现将系统阻尼比提高至 $\zeta=0.5$,自然振荡频率调整为 $\omega_n=2 \text{ rad/s}$,此时系统主导闭环极点将被校正至 $s_{1,2}=-1 \pm j\sqrt{3}$ 。为此,在主导闭环极点处必须满足特征方程 $1+G(s)G_c(s)=0$,即:

$$\begin{cases} \angle G(s)G_c(s)|_{s=-1 \pm j\sqrt{3}} = \pm 180^\circ \times (2k+1) \\ |G(s)G_c(s)|_{s=-1 \pm j\sqrt{3}} = 1 \end{cases} \quad (19)$$

此时单纯地改变系统增益并不能获得所希望的主导极点,所以必须在原系统开环传递函数中增加极点和零点,设校正装置的传递函数为:

$$G_c(s) = K_c \frac{s+T_1}{s+T_2} \quad (20)$$

其中, T_1 和 T_2 由幅角缺额确定; K_c 由开环增益缺额确定。

图 5 所示为确定参数 T_1 和 T_2 的方法。

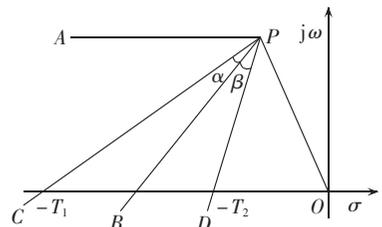


图 5 确定校正环节的零点和极点

Fig.5 Determination of pole and zero points of correction section

其中,点 P 是主导闭环极点所希望的位置之一, PA 为通过点 P 的水平线, PB 为 $\angle APO$ 的角平分线。设 PC 和 PD 分别确定了校正环节的零点和极点。基于以上假设,由三角形的外角定理可知,此时在理想极点 P 处校正环节所补偿的幅角缺额为 $\phi = -(\alpha + \beta)$ 。

对于图 1 系统,在理想极点 $s=-1+j\sqrt{3}$ 处有:

$$G(s)|_{s=-1+j\sqrt{3}} = 0.08 \angle -122.25^\circ \quad (21)$$

则由式(19)中的相角约束条件可知,所需补偿的幅角缺额为 $\phi = -57.75^\circ$ 。现令 $\alpha = \beta = -\phi/2 = 28.875^\circ$,则可以计算得到 $T_1 = 3.868, T_2 = 1.034$ 。所以有:

$$G_c(s) = K_c \frac{s+3.868}{s+1.034} \quad (22)$$

在理想极点 $s_1 = -1+j\sqrt{3}$ 处,有:

$$G_c(s)|_{s=-1+j\sqrt{3}} = 1.934 K_c \angle -57.75^\circ \quad (23)$$

根据式(19)中的幅值约束条件可得 $K_c = 6.463$ 。所以,将系统主导闭环极点校正至 $s_{1,2} = -1 \pm j\sqrt{3}$ 时,串联校正装置的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{6.463s+24.999}{s+1.034} \quad (24)$$

为了实际应用以及进行仿真验证,根据 $\frac{y(s)}{u(s)}$

$$\frac{G_c(s)G(s)}{1+G_c(s)G(s)} = \frac{G(s)}{1+H(s)G(s)}$$

转换至反馈回路,如图 6 所示。

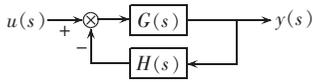


图 6 反馈校正系统

Fig.6 Feedback correction system

计算可得控制器 $H(s)$:

$$H(s) = (-0.2616s^{15} + 21.92s^{14} - 54.71s^{13} + 1970s^{12} - 1.462 \times 10^4 s^{11} - 5.158 \times 10^4 s^{10} - 1.663 \times 10^6 s^9 - 1.168 \times 10^7 s^8 - 8.502 \times 10^7 s^7 - 4.977 \times 10^8 s^6 - 2.074 \times 10^9 s^5 - 8.726 \times 10^9 s^4 - 2.235 \times 10^{10} s^3 - 5.69 \times 10^{10} s^2 - 7.562 \times 10^{10} s - 3.402 \times 10^{10}) \div (5.201s^{15} + 68.62s^{14} + 1244s^{13} + 1.176 \times 10^4 s^{12} + 1.126 \times 10^5 s^{11} + 7.832 \times 10^5 s^{10} + 4.951 \times 10^6 s^9 + 2.533 \times 10^7 s^8 + 1.098 \times 10^8 s^7 + 3.997 \times 10^8 s^6 + 1.121 \times 10^9 s^5 + 2.583 \times 10^9 s^4 + 3.776 \times 10^9 s^3 + 2.801 \times 10^9 s^2 + 7.98 \times 10^8 s) \quad (25)$$

控制器阶数过高,不适于实际应用,根据均方根法对其进行降阶处理,得到控制器 $H'(s)$ 。

$$H'(s) = \frac{-0.05029s^4 + 4.73s^3 - 40.05s^2 - 21.5s - 914.5}{s^4 + 5.742s^3 + 28.14s^2 + 21.45s - 6.513 \times 10^{-13}} \quad (26)$$

降阶前后控制器 Bode 图对比如图 7 所示,控制器性能在降阶前后并未改变。

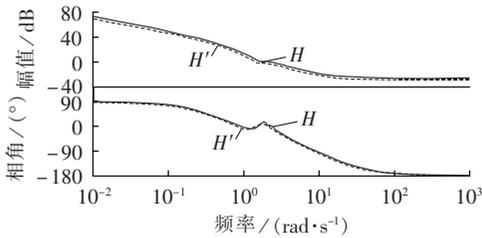


图 7 控制器 H 及降阶控制器 H' 的 Bode 图

Fig.7 Bode diagram of controller H and reduced-order controller H'

设计出根轨迹控制器后,为与传统频率控制方法进行比较,再次设计文献[7-9]中所提到的 PI 控制器。整定得到的最佳 PI 参数为:比例参数选取为 1,积分参数选取为 3。

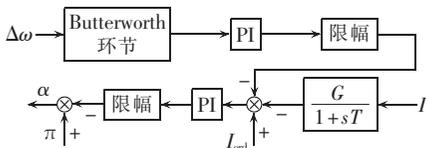


图 8 PI 结构频率控制器

Fig.8 Frequency controller with PI structure

3 仿真实验

将求得的根轨迹控制器 H' 和 PI 控制器分别配置到图 1 仿真系统中,施加不同的扰动在 PSCAD/

EMTDC 中进行验证。

3.1 联网运行转入孤岛运行

正常运行方式下,若发生 $N-2$ 故障导致换流母线与送端 750 kV 交流主网的交流联络线断开,图 1 中直流系统将进入孤岛运行。图 9 为在 1 s 时系统进入孤岛运行,控制器配置前后直流送端系统频率变化情况。

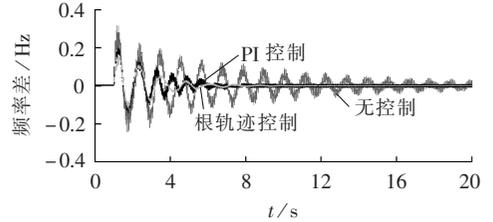


图 9 当系统进入孤岛运行时,控制器配置前后送端系统频率

Fig.9 Frequency variation of sending-end system operating in islanding mode, during putting into operation of controller

由图 9 可知,当系统由联网运行转入孤岛运行后,系统频率开始上升,最大频率偏差将达到 0.3 Hz 左右。随后,在发电机一次调频的作用下,系统频率波动开始逐渐降低。配置附加频率控制器后,2 种控制器均可以加快系统频率收敛速度,使系统频率恢复稳定。但是采用根轨迹控制时,系统频率收敛速度更快,系统频率稳定值与稳态值偏差更小。

3.2 送端系统三相短路故障

现以最为严重的送端交流系统三相短路故障为例进行说明。系统在孤岛运行方式下进入稳定运行后,设置 1 s 时刻节点 B 至节点 C 3 回交流线路中的某一回线 90% 处发生三相短路故障,故障后 0.1 s 故障消除。此时,控制器配置前后直流送端系统频率变化情况如图 10 所示。

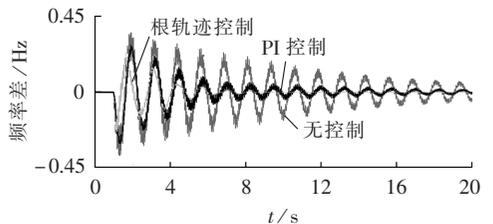


图 10 送端三相短路故障下,控制器配置前后交流系统频率

Fig.10 Frequency variation of sending-end AC system with three-phase short circuit fault, during putting into operation of controller

由图 10 可知,在孤岛运行方式下,交流系统发生三相短路故障后,系统频率失稳。配置附加频率控制器后,系统频率可以快速恢复稳定。但是采用 PI 控制时,系统频率虽然满足工况要求,但是仍有小波幅度的波动。而根轨迹控制可以很快地将系统频率

恢复至稳态值。

3.3 直流侧故障

设置 1 s 时刻直流系统发生故障,该扰动使得整流侧定电流控制器的电流整定值上升 0.05 p.u.。控制器配置前后直流送端系统频率变化情况如图 11 所示。

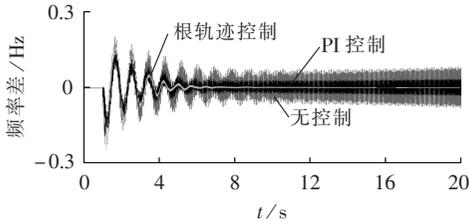


图 11 直流电流整定值上升 5% 时,控制器配置前后送端系统频率

Fig.11 Frequency variation of sending-end system during putting into operation of controller when DC current setting increases 5%

由图 11 可知,当直流电流整定值上升 5% 后,系统频率开始振荡,虽然初期有所收敛,但是最终系统频率将会发散失稳。根轨迹附加频率控制器可以很好地抑制系统频率振荡,使频率收敛至稳定。PI 控制器虽然对于频率振荡也有一定的控制作用,但是其控制效果明显不如根轨迹控制器。

由上述仿真可知,基于 TLS-ESPRIT 算法辨识系统传递函数,利用根轨迹校正原则设计的直流频率附加控制器,在各种故障下,均可有效地抑制系统孤岛运行时系统频率波动,保持系统频率稳定;并且在同等情况下,控制效果优于传统 PI 控制器。

4 结论

基于系统数学模型的经典控制理论方法应用于实际电网工程时,复杂的网络拓扑结构和多变的工况,增加了系统数学建模的难度。因此,利用辨识方法通过非线性时域仿真或现场测量数据直接导出简单的、精确的系统低阶线性化模型,并设计控制器具有广泛的实用价值。本文依据辨识出的系统传递函数,根据根轨迹校正原则设计的附加频率控制器,具有结构简单、效果显著的优点,同时设计过程也避免了控制参数整定的盲目性,适于工程实际应用,对于实际电网控制器设计具有参考意义。

参考文献:

[1] 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,2004:4-7.
 [2] BAHRMAN M P,JOHNSON B K. The ABCs of HVDC transmission technologies[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2007,5(2): 32-44.
 [3] 黎东祥,王渝红,丁理杰,等. 基于双 12 脉动阀组共同控制的特高压单阀组投退策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):148-154.

LI Dongxiang,WANG Yuhong,DING Lijie,et al. Blocking and deblocking strategy of single UHVDC converter group under joint control mode of dual 12-pulse converter groups[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):148-154.
 [4] 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):89-92.
 ZHAO Rui,LI Xingyuan,LIU Tianqi,et al. Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):89-92.
 [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] 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 Weimin,YIN Weiyang,et al. Island operation modes XS800 UHVDC system[J]. High Voltage Engineering,2010,36(1):185-189.
 [8] 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 islanded AC system at sending terminal of HVDC[J]. Power System Technology,2006,30(24):22-25.
 [9] 王华伟,韩民晓,范园园,等. 呼辽直流孤岛运行方式下送端系统频率特性及控制策略[J]. 电网技术,2013,37(5):1401-1406.
 WANG Huawei,HAN Minxiao,FAN Yuanyuan,et al. Sending end frequency characteristics under islanded operation mode of HVDC transmission system from Hulun Buir to Liaoning and corresponding control strategy[J]. Power System Technology,2013,37(5):1401-1406.
 [10] 李宽,李兴源,李保宏,等. 基于射影定理分层控制的次同步阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):80-84.
 LI Kuan,LI Xingyuan,LI Baohong,et al. Design of supplementary subsynchronous damping controller based on projective theorem for hierarchical control[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):80-84.
 [11] TRIPATHY P,SRIVASTAVA S C,SINGH S N. A modified TLS-ESPRIT-based method for low-frequency mode identification in power systems utilizing synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(2):719-727.
 [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 on controllability sensitive points of multi-HVDC systems based on TLS-ESPRIT method[J]. Power System Protection and Control,2012,40(19):121-125.
 [13] ZHANG Y,BOSE A. Design of wide-area damping controllers for interarea oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,

- 2008,23(3):1136-1143.
- [14] 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.
- [15] 罗斐,王健. 天广直流孤岛运行测试与分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(6):101-104.
LUO Fei,WANG Jian. Test and analysis of Tian-Guang HVDC transmission system in island operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2011,23(6):101-104.
- [16] 徐攀腾. 云广特高压直流输电工程送端孤岛频率控制分析[J]. 电力建设,2011,32(11):48-50.
XU Panteng. Frequency control analysis for island system at sending terminal in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission project[J]. Electric Power Construction,2011,32(11):48-50.
- [17] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:11-22.
- [18] OGATA K. 现代控制工程[M]. 5 版. 卢伯英,佟明安,译. 北京:电子工业出版社,2012:238-245.
- [19] PILOTTO L A S,BIANCO A,LONG W F,et al. Impact of TCSC control methodologies on subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003,18(1):243-252.

作者简介:



魏 亮

魏 亮(1990—),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(E-mail:willian_weiliang@163.com);

王渝红(1971—),女,重庆人,教授,博士生导师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(E-mail:yuhongwang@scu.edu.cn)。

Design of additional frequency controller for islanded sending-end operation of HVDC system

WEI Liang,WANG Yuhong,LI Xingyuan,LI Dongxiang,LIU Xiaohan,TANG Hua
(School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: Due to the lack of load frequency modulation effect in the islanding mode of HVDC system operation,the disturbance of AC/DC system may easily lead to system frequency instability. TLS-ESPRIT algorithm is applied to identify the transfer function of a real power system and an additional frequency controller is designed based on the root-locus approach,which utilizes the fast controllability of HVDC system power to stabilize the frequency of its sending-end AC system. A traditional PI controller is also designed and compared with the additional frequency controller by PSCAD/EMTDC simulation,and the results show the designed additional frequency controller enhances the frequency stability of islanded system effectively.

Key words: HVDC power transmission; islanded operation; frequency stability; root-locus approach; additional frequency control

(上接第 142 页 continued from page 142)

Linear optimal control of multi-functional grid-connected inverter

CHENG Chong¹,ZENG Zheng²,TANG Shengqing¹,YANG Huan¹,ZHAO Rongxiang¹

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The topology of a three-phase multi-functional grid-connected inverter with isolation transformer and *LC* filtering sections is converted into an equivalent structure of an inverter with *LCL* filter. The small-signal model of *LCL* filter is built based on its state equation and a linear quadratic optimal control strategy is proposed,which eliminates the inherent resonance phenomenon of *LCL* filter,compensates the harmonics,reactive power and unbalanced currents at the PCC(Point of Common Coupling),and improves the power quality of PCC. In order to enhance the system stability,a feedforward control algorithm is utilized to adapt to the linear quadratic optimal control and a PLL-less algorithm is applied to generate the compensating current and power tracking current. Simulative result with PSCAD/EMTDC verifies the correctness and validity of the proposed control strategy.

Key words: multi-functional grid-connected inverter; *LCL* filter; linear quadratic optimal control; feedforward control