

基于正规形理论的多馈入交直流输电系统非线性模式分析

杨 秀¹, 徐光虎²

(1. 上海电力学院 电力工程系, 上海 200090;

2. 南方电网公司 技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 传统的特征根分析法不能揭示电力系统的非线性相关作用。正规形理论将非线性系统通过坐标变换, 使得原系统与一个线性系统二阶或更高阶等价。将该方法应用到电力系统稳定分析中, 既保留了小信号法的优点, 又考虑了不同振荡模式间的非线性作用, 适用于系统大扰动后的低频振荡特性分析。在对一双馈入交直流并联系统建立动态方程的基础上, 运用正规形理论, 分析了多馈入交直流系统低频振荡模式的非线性相关作用。结果显示, 系统中各种模式是相互影响的, 不同运行方式下影响程度也不相同, 当系统重载且直流带调制方式下时, 区间振荡模式与直流调制模式间的非线性作用最强。时域仿真验证了这一结果。

关键词: 多馈入交直流输电系统; 正规形; 低频振荡; 非线性相关作用

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0006-05

0 引言

电力系统低频振荡问题的传统分析方法是以李雅普诺夫定律为基础的特征根方法^[1], 当系统受到小扰动, 扰动前后平衡点不变, 系统在平衡点处可以线性化, 当电力系统在运行中受到大扰动而发生振荡时, 扰动后的振荡也许对应另一种平衡状态, 这种方法就会带来较大误差。研究也表明, 电力系统的各振荡模式之间存在非线性相互作用^[2]。而特征值分析方法是一种基于线性理论的方法, 无法分析振荡模式之间的非线性相互作用, 也就不能把握电力系统非线性本质。

正规形(normal forms)方法是解决这一问题的有效方法。正规形理论^[3-4]的研究内容是对一个非线性微分方程组描述的系统, 寻求一种坐标变换, 使得原系统和一个线性系统二阶等价, 或更高阶地等价。最近十年, 美国学者 Vijay Vittal、Wolfgang Kliemann 等将这一理论应用于电力系统的稳定性分析, 研究内容主要集中在电力系统暂态稳定域估计、电力系统的预测解列分析、电力系统振荡分析以及振荡模式间的非线性相互作用分析^[5-7], 国内对该方法从基本理论到电力系统的应用也进行了多方面的论述^[8-12], 在此领域也进行了功角与电压稳定的研究^[13-15]。运用向量场的正规形理论分析低频振荡建立在特征值分析方法基础上, 具有特征值分析方法的优点, 但是它计及了系统动态方程的 Taylor 展开

的二次项或更高次项, 更接近实际的非线性系统, 可以分析系统受到大扰动后的低频振荡特性。现将正规形理论应用于一个双馈入交直流输电系统, 对交直流输电系统低频振荡的非线性相关性进行分析, 得出了新的结论。

1 交直流输电系统动态方程

1.1 系统简介

图 1 为一交直流并联系统, 全系统由 4 个区域组成: 区域 1、3 各包含 2 台容量为 900 MV·A 的同步发电机, 区域 2、4 内有 4 台相同容量的同步发电机; 区域 1、2 间以及区域 3、4 间分别通过交直流并联回路相连, 区域 1、2 间的交直流输电距离为 200 km (母线 7-8 间、8-9 间分别为 100 km), 区域 3、4 间的交直流输电距离为 260 km (母线 7'-8' 间、8'-9' 间分别为 130 km)。区域 1、3 间通过一条 210 km 的输电线路弱联系, 区域 2、4 间通过一条 10 km 的输电线

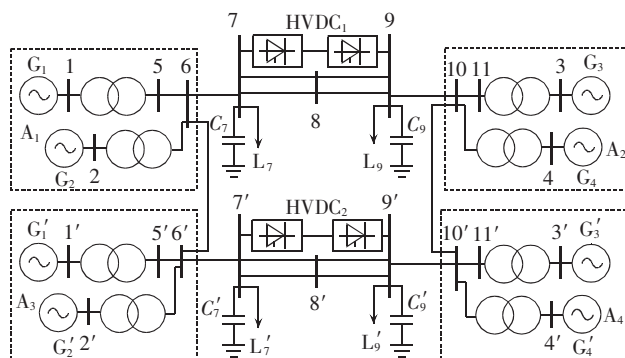


图 1 双馈入交直流并联系统

Fig.1 A dual-infeed AC/DC parallel system

收稿日期: 2006-11-14; 修回日期: 2007-03-01

基金项目: 上海市科委重大科技攻关项目 (041612012); 上海市科技启明星项目 (05QMX1432)

路强联系。系统中发电机、变压器以及其他线路参数可参考文献[16]。

直流系统均为单极六桥系统,其参数 $U_{dc}=800$ kV, $R_{cr}=R_{ci}=7.315\ \Omega$, $R_L=38\ \Omega$, $L_{dc}=2\ 600$ mH, 每个平波电抗器的电感均为 800 mH; $I_d=250$ A, $P_d=200$ MW, $\alpha_r=15^\circ$, $\alpha_i=142^\circ$, $\gamma_r=144^\circ$, $\gamma_i=19^\circ$ 。

通过调整联络线两侧负荷大小来调整联络线潮流,分析时联络线潮流考虑 2 种情况:一种为轻载,7-9 与 7'-9' 交流联络线潮流为 100 MW;另一种为重载,7-9 与 7'-9' 交流联络线潮流为 450 MW。为考察直流调制对非线性相关作用的影响,分别就系统在直流不带功率调制和直流带功率调制 2 种情况下进行分析,所谓功率调制就是指在整流器定电流控制中附加功率调制,在此以交流联络线功率作为调制信号。因此有 4 种运行方式:轻载直流无调制(L)、轻载直流带调制(LM)、重载直流无调制(H)、重载直流带调制(HM)。系统扰动为 1 s 时刻母线 10 发生三相短路, 0.05 s 故障切除。

运用正规形理论进行分析,首先应将整个系统表示为微分方程形式 $\dot{\mathbf{x}}=\mathbf{F}(\mathbf{x})$,对图 1 所示系统,动态元件主要包括发电机及其励磁系统、直流系统及其控制,下面分别介绍。

1.2 发电机及励磁系统模型

同步电机采用四阶模型表达,不计调速器与励磁系统动态特性,如式(1)所示。

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \Delta\omega\omega_0 \\ \Delta\dot{\omega} &= -\frac{D}{2H}\Delta\omega + \frac{1}{2H}[P_m - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \\ \dot{E}'_d &= \frac{1}{\tau_{q0}}[-E'_d + (X_q - X'_q)I_q] \\ \dot{E}'_q &= \frac{1}{\tau_{q0}}[E_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d)I_d]\end{aligned}\quad (1)$$

1.3 直流系统及其控制器模型

在机电暂态研究中,直流线路可以用一个等值 RL 回路表示,其动态方程为[8]

$$\begin{aligned}\dot{I}_{dc} &= \frac{1}{\tau_{dc}}I_{dc} + \frac{1}{\tau_{dc}R_{dc}}(\hat{U}_r \cos \alpha_r - \hat{U}_i \cos \beta_i) = \\ &= \frac{1}{\tau_{dc}}I_{dc} + \frac{1}{\tau_{dc}R_{dc}}(\hat{U}_r \cos \alpha_r + \hat{U}_i \cos \alpha_i)\end{aligned}\quad (2)$$

式中 $\hat{U}_r$ 、 $\hat{U}_i$ 分别为整流、逆变侧等值电压; α_r 、 α_i 分别为整流、逆变侧延迟触发电角; R_{dc} 为 HVDC 系统等值电阻; τ_{dc} 为直流线路时间常数,且有 $\tau_{dc} = L_{dc} / R_{dc}$ 。

整流侧采用带调制的定电流控制[7],以交流联络线功率作为调制输入信号,数学模型为

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_r &= \frac{1}{\tau_1}(-\alpha_r + \alpha_{ref}) + \frac{K_1 K_a}{\tau_1 \tau_a}(\tau_b X_{D1} + \\ &+ \tau_a X_{D2}) + \frac{K_1}{\tau_1}(I_{dc} - I_{ref}) \\ \dot{X}_{D1} &= -\frac{1}{\tau_w}X_{D1} + P_{ac} \\ \dot{X}_{D2} &= -\frac{1}{\tau_a}X_{D2} + \frac{1}{\tau_a}\left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_a}\right)X_{D1} = f_{11}\end{aligned}\quad (3)$$

逆变侧采用定电压控制[7],其对应的数学模型为

$$\dot{\alpha}_i = \frac{1}{\tau_2}(-\alpha_i + \pi - \beta_{ref}) + \frac{K_2}{\tau_2}(-U_i + U_{ref})\quad (4)$$

将以上几个微分方程合并,并与交直流接口方程组合,可得:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{U}) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{U}) &= 0\end{aligned}\quad (5)$$

其中 $\mathbf{U}$ 为代数变量,包括机端电压 U_T , 电流 I_d 、 I_q , 及交流联络线功率 P_{ac} 和逆变侧交流母线电压 U_i 。

在进行正规形分析时,需要将这些代数变量用状态变量表示,可以通过求解网络方程以及交直流的接口方程实现,具体方法参见文献[8]。通过上述变换,就可以将动态方程中出现的非状态量(代数变量)转换为状态量的表达形式,可以采用 MAPLE 软件中的符号计算工具进行推导,最终,系统正规形向量场就可表达为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x})\quad (6)$$

2 正规形分析方法

对于状态方程 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$, 将该状态方程在系统故障后稳定平衡点泰勒展开,其泰勒展开式可表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \frac{1}{2}\mathbf{x}^T \mathbf{H}\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{X}_2(\mathbf{x})\quad (7)$$

其中系统维数为 n , $\mathbf{A} = [\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{x}]_{x_{SEP}}$ 为雅可比阵, $\mathbf{H}^i = [\partial^2 f_i / (\partial x_j \partial x_k)]_{x_{SEP}}$ 对应第 i 个向量场的海森阵。

对 $\mathbf{A}$ 进行特征值分析,得到 $\mathbf{A} = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$, 以及右特征向量 $\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_n]$ (将 u_i 规范到范数 1)。首先进行相似线性变换 $\mathbf{x} = \mathbf{U}\mathbf{y}$, 则可得式(2)的二阶泰勒级数展开等价方程为

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{J}\mathbf{y} + \mathbf{Y}_2(\mathbf{y})\quad (8)$$

其中

$$\mathbf{Y}_2(\mathbf{y}) = \mathbf{U}^{-1} \mathbf{X}_2(\mathbf{U}\mathbf{y})\quad (9)$$

如果所研究的系统不存在二阶共振,即 $\lambda_j \neq \lambda_k + \lambda_l$ 对于任意的 $j, k, l \in (1, 2, \dots, n)$ 成立,则可进行如下非线性变换:

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} + \mathbf{h}_2(\mathbf{z})\quad (10)$$

其中

$$h_2^j(\mathbf{z}) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_{2kl}^j z_k z_l \quad j=1, 2, \dots, n$$

$$h_{2kl}^j = \frac{Y_{2kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j} \quad j, k, l=1, 2, \dots, n$$

使得在 Z 坐标系统中有

$$\dot{\mathbf{z}}_j = \lambda_j z_j\quad (11)$$

从以上方程可得到不同坐标系统的二阶显式解:

$$z_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t}\quad (12)$$

$$y_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}\quad (13)$$

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^n u_{ij} z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{j=1}^n u_{ij} \left[\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right]\quad (14)$$

其中, $z_{j0}(j=1,2,\cdots,n)$ 为变量 z_j 的初值。

当 y_j 的二阶部分 $\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$ 越大时, 系统的模式非线性相关性就较大, 因此, 可以采用

$\max_j |(y_{j0} - z_{j0})/y_{j0}|$ 、 $\max_{k,j} |h_{2kl}^j|$ 、 $\max_{k,j} |h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0}|$ 等指

标来衡量^[5], 在此定义模式 j 的非线性相关指标 η_1 为

$$\eta_1(j) = |(y_{j0} - z_{j0}) + \max(h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0})| \quad (15)$$

$\max_{k,j} |h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0}|$ 是复数形式, 其中, (k, l) 对应于 $|h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0}|$ 取最大值时的 (k, l) 组合。

3 系统非线性动态特性分析

首先, 对系统在上述 4 种运行方式下进行特征根分析, 并通过参与因子确定各模式的参与状态变量。

表 1 列出了机电振荡模态与直流系统的控制模态。

表 1 系统在不同运行方式下的关键特征根

Tab.1 Key eigenvalues of system under different operation conditions

模式	L	LM	H	HM
$\lambda_{1,2}$ (局部: G_1 & G_2)	$-0.6328 \pm j 6.1678$	$-0.6374 \pm j 6.2063$	$-0.6264 \pm j 6.1785$	$-0.6280 \pm j 6.2190$
$\lambda_{3,4}$ (局部: G_3, G_3' & G_4, G_4')	$-0.6675 \pm j 6.5497$	$-0.7044 \pm j 6.5532$	$-0.6453 \pm j 6.5518$	$-0.7133 \pm j 6.5545$
$\lambda_{5,6}$ (局部: G_4 & G_4')	$-0.6772 \pm j 6.8731$	$-0.0881 \pm j 2.5245$	$-0.0712 \pm j 2.3241$	$-0.2431 \pm j 2.4320$
$\lambda_{7,8}$ (局部: G_1' & G_2')	$-0.5640 \pm j 6.1127$	$-0.5707 \pm j 6.1875$	$-0.5385 \pm j 6.0980$	$-0.5467 \pm j 6.0871$
$\lambda_{9,10}$ (局部: G_3 & G_3')	$-0.3580 \pm j 5.7261$	$-0.3766 \pm j 5.7288$	$-0.3262 \pm j 5.6592$	$-0.3288 \pm j 5.6603$
$\lambda_{11,12}$ (局部: G_1, G_1' & G_2, G_2')	$-0.2544 \pm j 5.3731$	$-0.2762 \pm j 5.2871$	$-0.2180 \pm j 5.3369$	$-0.2487 \pm j 5.3210$
$\lambda_{13,14}$ (区间: A_1, A_3 & A_2, A_4)	$0.0855 \pm j 3.5521$	$-0.4435 \pm j 3.8421$	$0.2541 \pm j 3.2597$	$-0.5380 \pm j 3.7940$
$\lambda_{15,16}$ (HVDC ₁ 功率调制模式)	—	$-5.1545 \pm j 1.8670$	—	$-5.1633 \pm j 1.8320$
$\lambda_{17,18}$ (HVDC ₂ 功率调制模式)	—	$-5.9337 \pm j 1.8319$	—	$-5.7924 \pm j 1.6908$

小信号(线性)分析表明, 系统有 7 个机电振荡模式, 其中阻尼较弱的振荡模式(模式 13/14)为区间振荡模式, 其他均为局部(区内)振荡模式。从表 1 中系统加直流调制前后特征值变化可以看出, 直流调制能够明显提高区间振荡模式的阻尼, 系统在重载运行方式下这种变化尤为明显, 而直流调制对局部振荡模式的影响并不大。

表 2 列出了系统在不同运行方式下与区间振荡模式 $\lambda_{13,14}$ 相关的非线性相关系数 $|h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0}|$ 和非线性相关指标 η_1 , 作为对比, 也列举了局部振荡模式 $\lambda_{11,12}$ 的 $|h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0}|$ 与 η_1 。其中, 非线性相关系数列出了最大值以及对应的模式组合, 对于 HM 运行模式给出了最大的 2 个非线性相关系数。

表 2 不同运行方式下的非线性相关系数和非线性相关指标

Tab.2 Nonlinear interaction coefficients and indices of system under different operation conditions

运行方式	$j=13$		$j=11$	
	$ h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0} $	η_1	$ h_{2kl}^j z_{k0} z_{l0} $	η_1
L	0.0752 ($\lambda_{13}, \lambda_{14}$)	0.2661	0.1043 ($\lambda_{11}, \lambda_{12}$)	0.3197
LM	0.4556 ($\lambda_{13}, \lambda_{14}$)	0.8055	0.2128 ($\lambda_{11}, \lambda_{11}$)	0.4131
H	0.3731 ($\lambda_{13}, \lambda_{14}$)	0.7521	0.1742 ($\lambda_{11}, \lambda_{14}$)	0.2827
HM	1.3342 ($\lambda_{15}, \lambda_{16}$)	3.6690	0.2342 ($\lambda_{11}, \lambda_{12}$)	0.4131
	1.2557 ($\lambda_{17}, \lambda_{18}$)		0.1012 ($\lambda_{11}, \lambda_{11}$)	

注: ($\lambda_{13}, \lambda_{14}$) 表示 (k, l) 模式组合, 其他类同。

从表 2 可以看出 3 点。

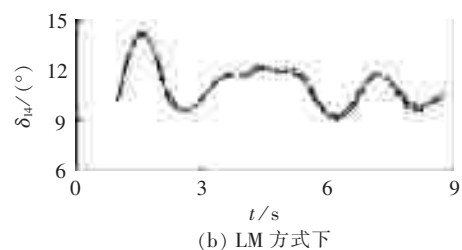
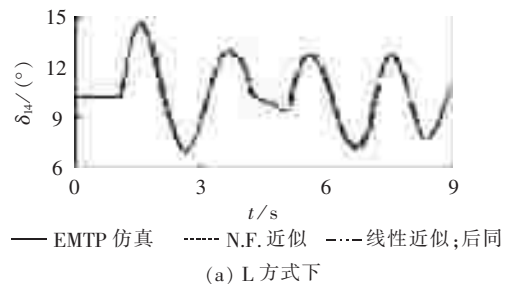
a. 联络线在轻载情况下, 对区间振荡模式的非线性相关系数影响较大的是机电组合模式, 而在重载带调制运行方式下, 直流调制模式对区间振荡模式的非线性相关系数最大, 非线性相关性指标明显高于其他几种运行方式下的数值。改变联络线功率进行分析, 发现随着联络线功率的增加, 直流调制模式对区间振荡模式的非线性相关系数相应增

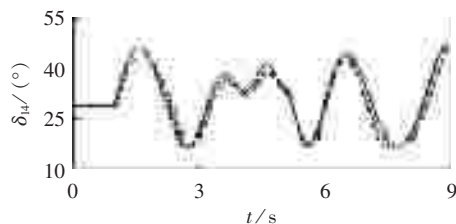
大, 而其他模式对区间振荡模式的非线性相关系数远小于直流调制模式, 说明在重载带调制运行方式下, 直流调制(HVDC₁、HVDC₂)对区间振荡的非线性作用最大。

b. 作为对比, 可以看出, 无论运行在何种方式下, 对局部振荡模式的非线性相关系数影响较大的是机电组合模式, 而直流调制模式的影响较小, 说明直流调制(HVDC₁、HVDC₂)对局部振荡的非线性作用不大。

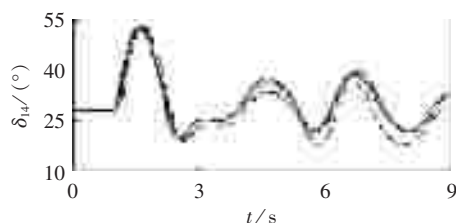
c. 从非线性相关指标看, 当系统运行在重载带调制方式下时, 区间振荡模式非线性相关指标最大, 说明系统的非线性相关特性主要是表现在区间振荡模式。

为验证结果的有效性, 将正规形的二阶显式解和线性部分解与时域仿真软件 EMTF 分析结果进行对比, 4 种运行方式的仿真结果如图 2(a)~(d)所示, 图中曲线为发电机 1 与 4 之间的功角 δ_{14} 的变化, “N.F. 近似”表示二阶正规形近似分析结果。





(c) H方式下



(d) HM方式下

图2 不同方式下 δ_{14} 变化曲线Fig.2 δ_{14} curves of system under different operation conditions

从图2可以看出,系统在L、LM、H运行方式下,二阶正规形近似分析结果最接近EMTP分析结果,而线性分析结果相比前者有一定的偏差,但不明显;而当系统在重载带调制运行方式下(图2(d)),二阶正规形近似分析结果仍然比较接近EMTP的分析结果,而线性近似分析结果偏离EMTP分析结果较大,在此基础上改变联络线潮流进行对比分析,结果表明,系统联络线潮流越紧,线性近似分析结果与时域仿真结果差别越大,而二阶正规形近似分析结果差别不大,这表明联络线潮流越紧,系统非线性作用越大,这与非线性相关指标的计算结果是一致的。

4 结论

传统的特征根法其本质上是一种线性分析方法,但是实际上电力系统是高度非线性系统,这种线性分析方法得出的结论往往不够精确甚至偏差很大,特别是系统处于紧运行状态(重载)或者系统受到大的扰动后,系统的机电振荡模式之间、控制模式之间以及机电振荡模式和控制模式之间往往存在较强的非线性相关作用。采用正规形理论对一双馈入交直流输电系统的非线性相关作用进行了研究,结果显示,当系统重载且直流带调制方式下时,区间振荡模式受到的非线性影响最大,并且主要体现在与直流调制模式间的非线性作用最强,通过时域仿真的对比分析,证明了上述结论。

参考文献:

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] LIU C,VITTAL V,KLIEMANN W,et al. Investigation of modal interaction and its effects on control performance in stressed power systems using normal forms of vector fields[J]. IEEE Trans on Power Systems,1996,11(2):781-787.
- [3] CHUA L O,KOKUBU H. Normal forms for nonlinear vector fields. Part 1:theory and algorithm[J]. IEEE Trans on Circuits

and Systems,1988,35(7):863-880.

- [4] CHUA L O,KOKUBU H. Normal forms for nonlinear vector fields. Part 2:application [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems,1989,36(1):51-70.
- [5] ZHU S Z,VITTAL V,KLIEMANN W. Analyzing dynamic performance of power systems over parameter space using normal forms of vector fields. Part I and Part II [J]. IEEE Trans on Power Systems,2001,16(4):444-455.
- [6] THAPAR J,VITTAL V,KLIEMANN W,et al. Application of normal form of vector fields to predict interarea separation in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1997,12(2):844-850.
- [7] LI Y X,VITTAL V,KLIEMANN W. Nonlinear modal interaction in HVDC/AC power systems with DC power modulation [J]. IEEE Trans on Power Systems,1996,11(4):2011-2017.
- [8] 李颖辉,张保会. 正规形理论在电力系统稳定性研究中的应用(一):从非线性系统到线性系统的映射[J]. 电力自动化设备,2003,23(6):1-5.
- LI Ying-hui,ZHANG Bao-hui. Application of norm form in study of power system stability. Part 1:mapping from nonlinear system to linear system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(6):1-5.
- [9] 李颖辉,张保会. 正规形理论在电力系统稳定性研究中的应用(二):电力系统上主导不稳定平衡点上局部流形的计算[J]. 电力自动化设备,2003,23(7):1-4.
- LI Ying-hui,ZHANG Bao-hui. Application of norm form in study of power system stability. Part 2:calculation of local manifolds on controlling unstable equilibrium point of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(7):1-4.
- [10] 李颖辉,张保会. 正规形理论在电力系统稳定性研究中的应用(三):电力系统运动方程泰勒展开的特点及矩阵表示[J]. 电力自动化设备,2003,23(8):1-4.
- LI Ying-hui,ZHANG Bao-hui. Application of norm form in study of power system stability. Part 3:characteristic of Taylor series for electric power system movement equation and its matrix formulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(8):1-4.
- [11] 李颖辉,张保会. 正规形理论在电力系统稳定性研究中的应用(四):复杂电力系统稳定边界点的研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):5-9.
- LI Ying-hui,ZHANG Bao-hui. Application of norm form in study of power system stability. Part 4:study on stability boundary of complex electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9):5-9.
- [12] 李颖辉,张保会. 正规形理论在电力系统稳定性研究中的应用(五):电力系统的失稳模式预测[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):9-13.
- LI Ying-hui,ZHANG Bao-hui. Application of norm form in study of power system stability. Part 5:prediction of electric power system unstable modes[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(10):9-13.
- [13] 徐东杰,贺仁睦,胡国强,等. 正规形理论在互联网低频振荡分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):18-23.
- XU Dong-jie,HE Ren-mu,HU Guo-qiang,et al. Analysis of lower frequency oscillation using norm form method [J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):18-23.
- [14] 张靖,文劲宇,程时杰,等. 基于向量场正规形的电力系统稳定模式相关性理论分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(11):82-86.
- ZHANG Jing,WEN Jin-yu,CHENG Shi-jie,et al. Theoretical analysis of the interaction between power system stability modes with the normal forms of vector fields[J]. Proceedings of

the CSEE, 2006, 26(11): 82-86.

- [15] 张靖, 文劲宇, 程时杰. 基于向量场正规形的电力系统功角与电压稳定特征分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 12-16.
ZHANG Jing, WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie. Normal forms of vector fields based analysis of power system angle and voltage stability characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 12-16.
- [16] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

杨 秀(1972-), 男, 江苏江都人, 副教授, 博士, 主要研究方向为 HVDC、FACTS 运行与控制(E-mail: yangxiu72@263.net);

徐光虎(1974-), 男, 安徽阜阳人, 工程师, 博士, 主要研究方向为 HVDC 系统非线性控制。

Nonlinear mode analysis of multi-infeed AC/DC parallel system based on norm form theory

YANG Xiu¹, XU Guang-hu²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Technology Research Center, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: Traditional eigenvalue analysis method can not reveal the nonlinear interaction of power system. However, the norm form theory makes nonlinear system 2-order or n -order equivalent to one linear system through coordinates transform. When used in power system stability analysis, it keeps the advantages of eigenvalue analysis method and takes the nonlinear interaction between different oscillatory modes into account, so it is suitable for low-frequency oscillation study of power system after large disturbance. Based on dynamic equations built for a dual-infeed AC/DC parallel system, the norm form theory is applied to the nonlinear mode interaction of power oscillation. Results show that the interaction exists between different oscillation modes, and its degree changes under different operation conditions. When the system is heavily stressed with DC power modulation, the interaction between area oscillation mode and DC power control mode is the strongest. Simulations validate the conclusion.

This project is supported by the Key Problem Tackling Plan (041612012) and Qimingxing Talent Plan (05QMX1432) of Shanghai Science and Technology Committee.

Key words: multi-infeed AC/DC system; norm form; lower frequency oscillation; nonlinear interaction

+++++