

AC/DC 系统低频振荡分析中的 HVDC 模型研究*

陈陈¹, 李立涅², 杨帆¹, 沈梁¹

(1. 上海交通大学, 上海, 200240; 2. 中国南方电网有限公司, 广东 广州, 510623)

HVDC Modeling for the Low Frequency Oscillation Analysis of AC/DC Interconnected Power Systems

CHEN Chen¹, LI Li-cheng², YANG Fan¹, SHEN Liang¹

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. China Southern Power Grid Ltd., Co., Guangzhou, Guangdong 510623, China)

Abstract: In the low frequency oscillation (LFO) analysis in an AC/DC interconnected system the part of HVDC links is usually described by a constant PQ model or a Quasi-Steady-State (QSS) model. In this paper the difference between the two models is investigated based on the augmented system state equation (ASSE), indicating that in the constant power control way the active power injected into or withdrawn from the AC system by converter is approximately invariant, while the reactive power drawn from the AC system is variable. A general LFO analysis of the China Southern Power Grid shows that it is feasible to describe the HVDC part by a constant PQ model. This analysis is carried out with a software developed by Shanghai Jiao Tong University for large-scale AC/DC interconnected power system small signal stability analysis software package (SSAP).

Key words: AC/DC power system; low frequency oscillation; constant PQ model; quasi-steady state model

摘要: 在一个交、直流互联的电力系统中, 直流输电部分一般用恒定功率模型或准稳态线性化模型来

描述。基于系统增广状态方程(ASSE), 分析了这两种模型的不同, 结果显示, 使用恒定功率模型时, 换流站注入或吸取交流系统的有功几乎是不变的, 而从交流系统抽取的无功是变化的。对南方电网交直流互联电力系统全网进行的低频振荡分析结果表明, 用恒定功率模型来描述直流线路部分是可行的。这种分析使用了上海交通大学开发的大型互联电力系统小信号稳定分析软件包(SSAP)。

关键词: 交直流互联电力系统; 低频振荡; 恒定功率模型; 准稳态模型

低频振荡是大规模互联电力系统潜在的问题, 会危及系统运行安全^[1,2]。对于大规模互联电力系统低频振荡计算, 多年来工程界多采用暂态稳定分析软件(例如BPA软件), 系统在所选结点处加有限扰动, 近似以扰动消除后续振荡特性作为低频振荡特性。在直流系统两端的交流系统较强的情况下, 将直流系统简化表示为在两端换流母线处消耗或注入恒定有功功率和无功功率的负荷, 这种HVDC模型称为恒定功率模型^[3-6]。如中国版BPA小干扰稳定分析程序^[7]、加拿大PowerTech公司的DSA软件包中的SSAT都提供了类似的直流系统处理方法。

上海交通大学在承担有关三峡工程的国家重点攻关项目中, 选用隐式重启动Arnoldi方法(IRA)编制了特大规模互联电力系统小信号稳定分析软件

* 国家科技支撑计划“特高压输变电系统开发与示范项目”课题资助(课题编号2006BAA02A17)。

SSAP^[8-10]。该软件计算规模不受限制,并将 HVDC 较详细的准稳态模型编入。本文详细进行 HVDC 的恒定功率模型和准稳态模型的理论分析和仿真比较,并用南方电网全网计算低频振荡的结果对比检验了两种模型。

1 交直流系统线性化模型

1.1 HVDC 线性化准稳态模型

一组单极 12 脉动换流器基本电路结构如图 1。

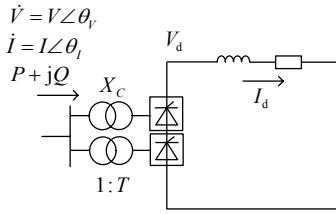


图 1 准稳态模型换流器电路
Fig. 1 Converter of QSS model

稳态运行时,换流器的各方程式归纳如下:

$$\begin{aligned} V_{d0} &= (3\sqrt{2}/\pi)BTV \\ V_d &= V_{d0} \cos \alpha - (3/\pi)X_C I_d B \\ P &= V_d I_d, \quad Q = P \tan \varphi \\ \varphi &\approx \arccos(V_d/V_{d0}) = \theta_v - \theta_i \\ I &= (\sqrt{6}/\pi)BT I_d \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中 V 为换流母线电压; T 为换流变匝数比; B 为串联的桥数; X_C 为每相的换相电抗; P 、 Q 、 I 分别为换流母线注入换流器的交流有功、无功、电流; V_d 、 I_d 为直流电压、电流。HVDC 准稳态模型的有效性验证见文献[6]。将式(1)在稳定运行点线性化,可得 HVDC 换流器的准稳态小信号模型。

分别对整流器和逆变器进行建模,可以得到两组线性化的代数方程。然后与直流控制系统、直流线路的状态方程结合起来,得到直流系统的小信号线性化准稳态模型,其接口关系如图 2 所示:

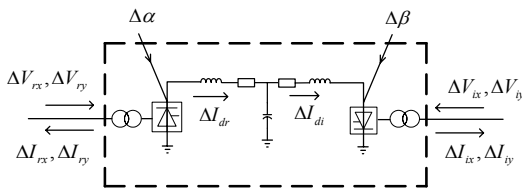


图 2 准稳态模型接口关系
Fig. 2 Interface of QSS model

1.2 系统线性化模型

将交直流系统中所有动态元件状态方程线性化后组合,系统中的变量只含状态向量 X 和节点电压向量 V , 如式(2)所示:

$$\begin{cases} \dot{X} = J_A X + J_B V \\ I = J_C X + J_D V \end{cases} \quad (2)$$

交直流系统中的电力网络和静态元件可以用一组代数方程描述:

$$I = YV \quad (3)$$

其中 V 和 I 各表示节点电压和注入电流微增量。合并式(2)和式(3),消去向量 I ,可得全系统增广状态方程组:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_A & J_B \\ J_C & J_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ V \end{bmatrix} \quad (4)$$

2 基于增广状态方程的模式分析方法

若单独取 X 为状态变量将电力网络收缩到发电机内节点,丢失网络拓扑结构和各个元件上的功率变化信息。本文所关心的是直流准稳态模型与恒定功率模型之间的差别,也就是直流系统注入网络的有功功率和无功功率在多大程度上保持恒定,并且要分析交直流系统在低频振荡时各元件和支路上的功率振荡特性,所以基于增广系统状态方程(4)对增广状态矩阵进行模态分析时,可按下式定义增广特征向量:

$$\begin{bmatrix} J_A & J_B \\ J_C & J_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi_v \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \varphi \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \psi^T & \psi_v^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_A & J_B \\ J_C & J_D \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \psi^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 λ 为系统矩阵 A 的特征值, φ 和 ψ 分别为 A 的右特征向量和左特征向量。 $\varphi_a = [\varphi^T, \varphi_v^T]^T$ 为增广右特征向量, $\psi_a = [\psi^T, \psi_v^T]^T$ 为增广左特征向量。记 $\varphi_a = [\varphi_{a1}, \dots, \varphi_{an}]$, $\psi_a = [\psi_{a1}, \dots, \psi_{an}]$, 此时系统零输入响应为:

$$\begin{bmatrix} X(t) \\ V(t) \end{bmatrix} = (\psi_1^T X_0) \varphi_{a1} e^{\lambda_1 t} + \dots + (\psi_n^T X_0) \varphi_{an} e^{\lambda_n t} \quad (7)$$

式(7)给出了系统各个状态变量 \mathbf{X} 和节点电压 \mathbf{V} 的时域响应信息。利用 \mathbf{X} 和 \mathbf{V} 进行组合, 就可以得到网络中各个元件和支路的功率响应。比较直流系统和其他动态元件的注入功率, 以及各支路间的功率分布情况, 就可以对直流系统注入功率的相对变化程度做出判断。例如, 对于某一低频振荡模态, 直流系统有功功率和无功功率中该模态的分量为 0, 则认为直流系统对于该模态是“功率恒定”的。

3 四机系统算例分析

3.1 交直流系统的功率振荡特性分析

图 3 所示为一交直流并联四机 11 节点系统, 该系统由两个区域组成, 每个区域各有两台容量为 900 MVA 的同步发电机, 区域 A 通过交流并行联络线向区域 B 输送 400 MW 有功功率^[11,3]。

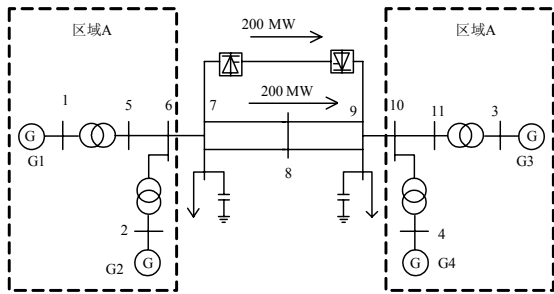


图 3 两区域交直流并联系统

Fig. 3 A two-area system with parallel dc-ac ties

加设并行的直流系统, 单极 12 桥系统, 参数为: $V_{dc}=500$ kV; $P_{dc}=200$ MW; $R_{dc}=2$ Ω ; $L_{dc}=200$ mH; $T_{\gamma}=T_i=1.1$; $\alpha=15^\circ$; $\gamma=18^\circ$ 。整流侧采用定功率控制, 逆变侧采用定电压控制。SSAP 计算整个系统得到特征值共 42 个, 低频机电振荡三组特征值如表 1 所示。模态 1 为 A 和 B 之间的区间振荡; 模态 2 为区域 A 内发电机 G1 和 G2 间振荡; 振荡模态 3 为区域 B 内发电机 G3 和 G4 间振荡。其他特征值多与发电机阻尼绕组和励磁系统相关, 阻尼良好。

本文提出的基于增广状态矩阵的模态分析方法可以计算得到各发电机和直流系统的注入功率, 以及各支路间的功率分布情况。对于模态 1 来说, 如果将直流系统简化为恒定功率模型, 该模型的有功功率恒定这一假设成立而无功功率恒定这一假设与理论分析结果不符, 可能会引起一定的误差。

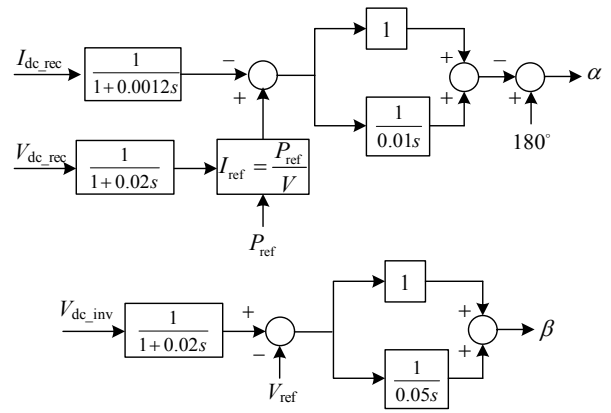


图 4 直流系统控制框图

Fig. 4 Control system of HVDC

表 1 低频振荡模态特征值
Table 1 Eigenvalues of LFO modes

模态	特征值	频率 ω /Hz	阻尼比 ζ %
1	0.070 4±j3.397	0.540 7	-2.07
2	-0.505 5±j6.198	0.986 4	8.13
3	-0.512 7±j6.400	1.019	7.99

直流系统在定功率控制运行时, 换流站消耗的无功功率和有功功率之间的关系如下:

$$Q = P \tan \varphi \quad (8)$$

$$\cos \varphi \approx \cos \alpha a - R_c I_d / V_{d0}$$

当直流系统受到扰动时, 为了保持直流传输功率 P 的恒定, 触发角 α 自动进行调节, 而换流母线处的功率因数角 φ 也随之改变。因此换流站消耗的无功功率 Q 并不保持恒定。

下面采用 EMTDC 软件以时域仿真验证这一结论。图 5 所示为四机系统母线 8 发生瞬时三相接地短路故障后, 两端换流器注入或消耗的功率以及触发角的变化曲线。

由图 5 可见, 由于存在不稳定的区间振荡模态, 故障后系统发生了低频振荡, 直流系统两端换流站注入或消耗的有功功率基本保持恒定, 整流站消耗的无功功率随触发角 α 振荡而发散。且整流站无功功率的振荡幅值大于 3 号和 4 号机组的无功振荡幅值。时域仿真结果很好地验证了本节的理论分析。

3.2 两种直流模型计算结果的对比分析

仍以交直流四机系统为算例比较不同运行方式下直流恒定功率模型对低频振荡结果的影响。在保守。随着直流系统功率比例提高, 这种差别逐渐增

大。当直流系统的传输功率接近 400 MW 时（此时交流联络线上的功率约为 0 MW），采用恒定功率模型得到的特征值实部为 0.096（阻尼比为-2.8%），采用准稳态模型得到的特征值实部为 0.062（阻尼比为-1.8%）。

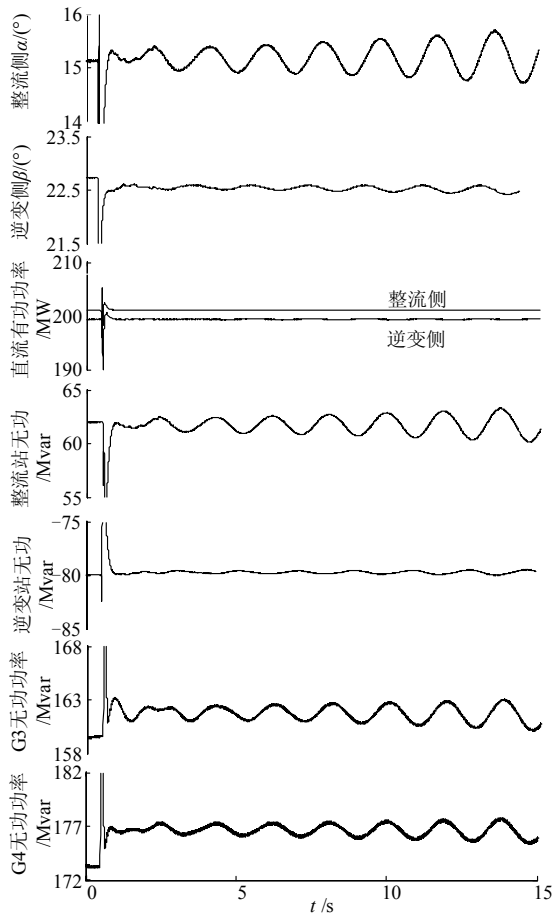


图 5 扰动发生后仿真结果
Fig. 5 Simulation results after disturbance

因此，当直流传输功率在交直流系统中所占比例较高时，直流系统应尽可能采用比较详细的准稳态模型表示。对于区内振荡模式 2 和 3，采用两种直流模型计算得到的各组特征值在数值上非常接近。持交直流联络线总的输送功率为 400 MW 的前提下，逐渐增大直流传输功率的比例（从 0 MW 增大到 400 MW）。

对于区间振荡模式 1，采用恒定功率模型计算得到特征值分析较准稳态模型稳定性差，结果偏保守。实际的交直流并联系统发生低频振荡时，运行人员通常采取的措施之一就是减少交流联络线输送

功率的同时提升直流系统输送功率。经验表明此方法可有效地抑制低频振荡的扩散。

4 南方电网交直流系统分析中的模型比较

南方电网 2010 年的一个特定运行方式，系统中有 5 条直流线路，其中包含待建的±800 kV 特高压直流输电线路。分析中，将三广直流线路断开，注入功率看作一个理想的功率源；其余直流输电系统分别采用准稳态模型和恒定功率模型进行计算，直流线路整流侧均采用定功率控制，逆变侧均采用定熄弧角控制。等值简化后的系统有 373 台发电机，1 857 个节点，3 008 条支路，868 个负荷。负荷采用静态 ZIP 模型。两种直流模型 SSAP 计算结果如表 2 和表 3 所示：

表 2 采用准稳态模型的计算结果
Tab.2 Eigenvalues with quasi-steady state model

编号	特征值	频率/Hz	阻尼比
1	-0.283 2±j6.029 4	0.959 6	0.046 9
2	-0.322 5±j6.523 2	1.038 2	0.049 4
3	-0.239 2±j6.732 6	1.071 5	0.035 5
4	-0.260 6±j7.211 5	1.147 8	0.036 1
5	-0.319 3±j7.465 1	1.188 1	0.042 7
6	-0.313 5±j7.609 0	1.211 0	0.041 2
7	-0.393 3±j8.594 9	1.367 9	0.045 7
8	-0.375 6±j9.015 6	1.434 9	0.041 6
9	-0.477 2±j9.784 8	1.557 3	0.048 7
10	-0.230 6±j9.946 3	1.583 0	0.023 2

表 3 SSAP 采用恒定功率模型的计算结果
Tab.3 Eigenvalues with constant PQ model

编号	特征值	频率/Hz	阻尼比
1	-0.278 4±j6.017 2	0.957 6	0.046 2
2	-0.322 5±j6.521 2	1.037 9	0.049 4
3	-0.239 4±j6.732 3	1.071 5	0.035 5
4	-0.263 2±j7.206 0	1.146 9	0.036 5
5	-0.319 2±j7.465 2	1.188 1	0.042 7
6	-0.319 5±j7.588 5	1.207 7	0.042 0
7	-0.393 3±j8.594 9	1.367 9	0.045 7
8	-0.378 0±j9.010 2	1.434 0	0.041 9
9	-0.477 7±j9.784 0	1.557 2	0.048 7
10	-0.230 9±j9.946 1	1.583 0	0.023 2

5 结 论

在大型交直流并联电网小干扰稳定分析计算中, 不考虑直流附加控制的情况下, HVDC 直流系统可以用恒定功率模型来简化不会引起显著误差。HVDC 的无功虽然不保持恒定, 但影响不大。本文利用上海交通大学开发的小干扰稳定分析软件包 SSAP, 通过对四机系统分析和南方电网全网(2010 年的一个特定运行方式) 的计算后证明直流系统采用详细准稳态模型和恒定功率模型计算得到的低频振荡特征值差别不大。SSAP 软件已编入了 HVDC 的准稳态模型, 为进一步研究 HVDC 附加控制抑制大规模交直流互联电力系统低频振荡的作用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 毛晓明, 吴小辰. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2):6-9.
MAO Xiao-ming, WU Xiao-chen. Analysis on operational problems in South China AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2):6-9.
- [2] 中国南方电网公司. 交直流电力系统仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 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] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15):7-11.
XU Zheng, CAI Ye, LIU Guo-ping. Some problems in the simulation of large-scale ac/dc power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15):7-11.
- [5] 吴红斌, 丁明, 李生虎. 直流输电模型和调节方式对暂态稳定影响

- 的统计研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):32-37.
WU Hong-bin, DING Ming, LI Sheng-hu. Statistical research on the effects of HVDC models and controls to transient stability of power systems[J]. Proceedings of the Csee, 2003, 23(10):32-37.
- [6] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12):36-39.
ZHOU Chang-chun, XU Zheng. Simulation validity test of the HVDC quasi-steady-state model[J]. Proceedings of the Csee, 2003, 23(12):36-39.
 - [7] 中国电力科学研究院. 中国版BPA 暂态稳定程序用户手册[M]. 中国电力科学研究院, 2000.
 - [8] GU Han-yu, CHEN Chen. Using Implicitly Restarted Arnoldi Method for Eigenanalysis of Power Systems[C]// IFAC World Congress, IFAC-7C-05-1, July 1999, Beijing.
 - [9] 谷寒雨, 陈陈. 一种新的大型电力系统低频机电模式计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9):50-54.
GU Han-yu, CHEN Chen. A new algorithm for the computation of low frequency electromechanical oscillation modes of large power systems[J]. Proceedings of the Csee, 2000, 20(9):50-54.
 - [10] 励刚, 陈陈. 应用设计模式开发小干扰稳定性分析软件包[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1):13-17.
LI Gang, CHEN Chen. Application of design patterns for developing small signal stability analysis package[J]. Proceedings of the Csee, 2002, 22(1):13-17.
 - [11] KUNDUR P. Power System Stability and Control[M]. New York, McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2007-10-08

作者简介:

陈陈(1938 -), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统稳定与控制研究。

李立涅(1941 -), 男, 教授级高级工程师, 长期从事电网规划、建设以及直流输电技术研究和直流工程建设。

杨帆(1980 -), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流电力系统低频振荡及次同步振荡。

(本文责任编辑 张亚拉)

※信息与报道※

南方电网公司评选出 2007 年度科学技术奖项目

9月5日, 中国南方电网有限责任公司召开2007年度科学技术奖励评审委员会会议, 就公司总部和各分子公司推荐80项优秀成果进行了审核, 并评定了2007年度科学技术项目一等奖2项、二等奖17项及三等奖25项。

荣获一等奖的两个项目为:《±800 kV 直流外绝缘技术开发及设备研制》,《南方电网交直流控制保护配合研究与实施》;前者由南方电网技术研究中心、东莞高能实业有限公司、清华大学、南通市神马电力科技有限公司、重庆大学和西安大学联合完成;后者由南方电网公司生产技术部、南方电网电力调度通信中心、南方电网技术研究中心和南方电网超高压输电公司联合完成。

公司总经理赵建国作了总结发言, 充分肯定了公司

2007年度科技创新工作所取得的成果, 并对本届评奖工作整体效果表示满意。

他强调指出, 南方电网的快速发展将带来各种富有挑战性的前沿课题, 科技创新工作必须不断地上层次、上水平。一要及时总结科技项目成果, 形成自主知识产权, 加大科技项目成果的应用推广工作, 将科技项目成果应用于生产实际, 促进公司安全生产和经营管理水平的提高;二要紧密围绕公司重大科技攻关领域开展研究, 为南方电网的安全稳定运行和长远发展提供强有力的先进技术支持;三要积极开发节能技术和设备的开发应用, 推动节能工作上层次;四要认真做好国家重大科技项目攻关工作, 确保完成国家重大科技项目研究任务。

(本刊编辑部)