

并联交流系统强度对换流母线电压稳定性的影响

徐梅梅¹, 李兴源¹, 白加林², 贺洋¹, 湛天亮³, 郭铃铃³

(1 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;
3 乐山电业局夹江供电局, 四川 乐山 614100)

摘要:随着中国互联电网的发展, 交直流并联输电系统的电压稳定问题迫切需要研究。从并联交流系统强度出发, 以四机两区域系统为例, 利用负荷导纳模型算法求取节点电压稳定极限, 然后采用负荷裕度和特征值分析方法, 详细讨论了并联交流系统强度大小对逆变侧换流母线电压稳定性的影响。最后, 利用电磁暂态仿真程序 EMTDC/PSCAD 对系统进行动态仿真, 结果表明在重负荷条件下强并联交流系统有利于提高换流母线的电压稳定性。

关键词: 并联交流系统强度; 电压稳定性; 负荷裕度; 特征值分析; 交直流并联系统

Abstract: With the development of the interconnected power system in China, the voltage stability of AC/DC parallel transmission system needs to be researched. Taking the modified two-area four-generator power system for example, the admittance model algorithm is adopted to calculate the static voltage stability limit in load bus, then the influence of parallel AC system strength on voltage stability at inverter commutation buses is discussed by means of load margin and eigenvalue analysis method. Based on the electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC, it is shown that in heavy load conditions a strong parallel AC system is beneficial to enhance the voltage stability at commutation buses.

Key words: parallel AC system strength; voltage stability; load margin; eigenvalue analysis; AC/DC parallel transmission system

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0005-04

实际的 HVDC 系统往往和交流系统相互连接, 从而形成交直流互联电网。交直流系统之间的相互作用, 尤其是与弱交流系统连接时, 会带来电压不稳定性、暂态不稳定、动态过电压和谐波不稳定等一系列问题。其中, 交直流混合电网的电压稳定性研究不同于纯交流和单馈入直流电网, 由于交直流系统的相互作用, 增加了研究的复杂性。因此对交直流并联电网电压稳定性的研究具有现实意义。

近年来, 分析交直流系统电压稳定的许多方法都是把用于纯交流系统的静态电压稳定方法推广到交直流系统中。如文献 [1] 提出的最大功率曲线 (MPC) 法是基于最大可用功率, 用有效短路比 (ESCR) 来衡量电压稳定性, 系统越强, 换流站交流母线的电压稳定性越强。文献 [2] 中的电压稳定性因子 (VSF) 法是基于电压灵敏度, 以 VSF 为稳定性判据, 类似于交流系统中 dQ/dV 的指标, 本质上这两种方法都是把系统状态对系统变量微小变化的灵敏度作为电压稳定的衡量标准。文献 [3] 和 [4] 讨论了负荷

静态特性对 3 种典型 HVDC 系统的功率/电压稳定边界指标的影响, 提出了 ALCI 指标, 以此来确定不同运行条件下的最不宜负荷特性。文献 [5] 讨论了关于 HVDC 系统功率/电压稳定性研究的详细发电机和电压控制数学模型。文献 [6] 对 HVDC 系统的非线性现象进行了分析, 提出 HVDC 的电压失稳机理是由于 Hopf 分岔而导致的振荡失稳。文献 [7] 则把崩溃点法和延拓法结合起来用于交直流系统电压稳定性的研究。

下面首先给出了研究交直流并联系统电压稳定性所采用的简单模型^[3], 在此基础上介绍交流系统强度的相关指标以及静态电压稳定性分析方法。然后在电磁暂态仿真软件 EMTDC/PSCAD 平台上, 搭建了四机两区域的交直流混合系统^[8], 根据负荷导纳模型算法^[9, 10, 11]准确求取节点的电压稳定极限, 并且采用特征值分析^[3, 12]和模态电压稳定性因子^[3, 12]来详细讨论并联交流系统强度对逆变侧换流母线电压的影响。最后利用 PSCAD 进行动态仿真, 结果表明在重负荷条件下, 弱并联交流系统不利于交直流系统换流母线的电压稳定性。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50595412); 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2004CB217907); 国家科技支撑计划资助项目 (2008BAA13B01)。

1 交直流并联系统静态电压稳定性研究模型

采用图 1 的单条 HVDC 与交流线路并联 (SIFAC) 的交直流系统模型^[3], 相对送端而言, 系统更容易在受端发生电压失稳, 下面选择逆变侧换流母线作为研究对象。

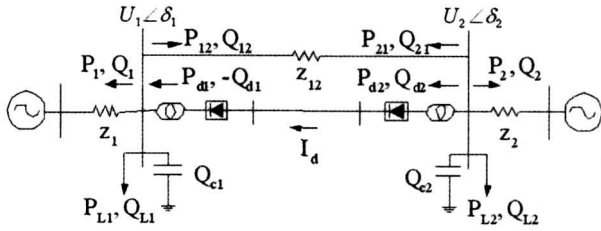


图 1 单条 HVDC 与交流线路并联交直流系统模型

2 交流系统强度的相关指标

一般地, 用短路比 (SCR) 来定义单直流换流站母线的稳定性能:

$$SCR = \frac{S_{sc}}{P_{dN}}$$

其中, S_{sc} 是换流母线的短路容量, P_{dN} 是换流站的额定功率。

为计及换流站无功补偿的影响, 通常采用有效短路比:

$$ESCR = \frac{S_{sc} - Q_c}{P_{dN}}$$

基于图 1 的 SIFAC 交直流系统模型, 为了计及并联交流输电系统强弱程度对换流母线特性的影响, 这里定义一个新指标——并联交流系统强度指标 (Parallel AC System Strength Index), 以此表示并联交流系统相对于直流系统的强度:

$$PACSSI = \frac{S_{12}}{P_{dN}}$$

其中, S_{12} 为换流母线处并联交流系统的短路容量。

3 负荷裕度分析

负荷裕度是最基本的、被广泛接受的电压稳定性指标。基于负荷裕度判别法的静态电压稳定分析计算量小, 在一定程度上能较好地反映系统的电压稳定水平, 并能够给出系统的电压稳定裕度。负荷裕度分析^[8, 13]就是从系统的运行状态出发, 按照某种模式增

长传输功率或者负荷, 逐步逼近电压崩溃点, 而当前运行点到电压崩溃点之间的距离即称之为负荷裕度。通常采用功率裕度指标来反映节点的强弱:

$$K_{pt} = \frac{P_{crit} - P_{0i}}{P_{0i}}$$

式中: P_{crit} 为节点 i 的极限功率; P_{0i} 为节点 i 当前的运行功率。

文中采用负荷导纳模型算法, 将重负荷节点的注入功率以一等效导纳表示, 按一定增长方式逐步增加节点负荷并进行常规潮流计算, 通过判断系统是否达到传输功率极限来准确求取静态电压稳定临界点。

4 特征值分解和模态电压灵敏度因子

基于图 1 所示的 SIFAC 系统模型, 潮流方程如下。逆变侧交流母线:

$$0 = P_1 + P_{12} + P_{L1} - P_{d1} \quad (1)$$

$$0 = Q_1 + Q_{12} + Q_{L1} + Q_{d1} - Q_{c1} \quad (2)$$

整流侧交流母线:

$$0 = P_2 + P_{21} + P_{12} + P_{d2} \quad (3)$$

$$0 = Q_2 + Q_{21} + Q_{12} + Q_{d2} - Q_{c2} \quad (4)$$

线性化潮流方程 (1)~(4), 且假设换流站交流母线上的有功增量为 ΔQ , 经等式变化后得到系统的简化雅可比矩阵 J_{qv} 如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta U_1}{U_1} \\ \frac{\Delta U_2}{U_2} \end{bmatrix} \Rightarrow [\Delta Q] = J_{qv} \frac{\Delta U}{U} \quad (5)$$

将简化矩阵 J_{qv} 进行特征值分解为:

$$J_{qv} = M \lambda N$$

式中, M 和 N 分别为 J_{qv} 的左右特征向量; λ 为 J_{qv} 的特征值矩阵。将其带入式 (5) 中变化可得:

$$\frac{\Delta U_i}{U_i} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_i$$

式中, λ_i 为 J_{qv} 的第 i 个特征值; ΔQ_i 为第 i 个无功变化量; ΔU_i 为第 i 个电压变化量。

矩阵 J_{qv} 最小特征值的倒数定义为模态电压稳定因子, 即 MVSF 大于 0 表明系统处于稳定运行状态。MVSF 越小, 则系统越稳定; 当 $\det(J_{qv}) = \lambda_1 \lambda_2$ 接近 0 时, MVSF 趋近于无穷大, 系统处于极其不稳定的运行状态。因此, 可以等价使用 J_{qv} 的最小特征值

λ_i 来描述系统的稳定性; 当 $\lambda_i > 0$ 时, 系统稳定; 当 $\lambda_i < 0$ 时, 系统失稳; 当 $\lambda_i = 0$ 时, 系统处于电压崩溃临界状态。 λ_i 的幅值则决定了系统临近电压不稳定的程度。

5 算例分析

采用图 2 所示的四机两区域交直流并联系统进行静态和仿真分析。

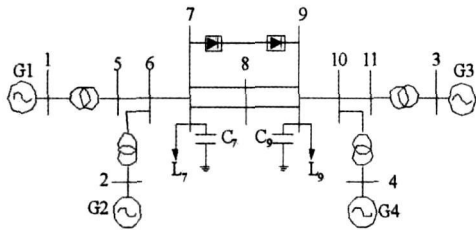


图 2 四机两区域的交直流并联系统

根据文献 [4] 提出的 ALCI (Active Load Characteristics Index) 指标, 确定恒功率模型为该系统的最佳不宜负荷特性。在 EMTDC/PSCAD 平台上, 搭建此交直流混合系统, 直流输电系统采用详细模型, 控制方式为: 定功率运行 $P_d = 200$ MW, 整流侧定电流控制, 逆变侧定熄弧角 $\gamma = 22^\circ$ 。通过改变并联交流输电线的距离, 在 3 种不同的系统运行条件下, 运用以上所述的分析方法来研究并联交流系统强度对逆变侧换流母线电压稳定性的影响。最后对其进行动态仿真, 以此验证所得结论的正确性。

5.1 静态分析

5.1.1 相关指标与裕度分析

根据前述的定义, 计算 3 种情况在额定运行条件下的交流系统强度和换流母线 9 的功率裕度指标, 分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 3 种情况的有效短路比与并联交流系统强度

案例	距离 (km)	S_{sc} (MVA)	S_{12} (MVA)	Q_c (Mvar)	P_{dN} (MW)	E_{scr}	PACSSI
1	120	3 500	1 127	450	200	15.25	5.635
2	220	3 167	751.6	450	200	13.58	3.758
3	300	3 026	597.6	450	200	12.88	2.988

表 2 换流母线 9 的极限功率与负荷裕度

案例	距离 (km)	P_{cr0} (MW)	V_{cr0} (p.u.)	K_{p0}
1	120	2 103.2	0.877 1	0.190 3
2	220	2 065.8	0.888 9	0.169 1
3	300	2 053.2	0.905 8	0.162 0

由两表比较得知: 并联交流系统强度越大, 则系统短路比越大, 换流母线的稳定裕度越大。说明在一定的

直流控制方式下, 提高并联交流系统强度, 使得对受端交流系统的功率支援增大, 从而加强交流系统对直流系统的无功支持, 有助于提高换流母线的电压稳定性。

5.1.2 特征值分析

表 3 给出了对应以上 3 种情况在同一负荷水平下换流母线的 MVSF, 而表 4 则给出了在不同负荷水平下的特征值。

表 3 换流母线的模态电压灵敏度因子

负荷水平 (p.u.)	Case 1	Case 2	Case 3
$S_9 = 17.67 + j1.0$	0.074 2	0.076 2	0.077 6

表 4 换流母线的特征值

负荷水平 S_9 (p.u.)	16.786 + j1.95	17.67 + j1.0	19.437 + j1.1
Case 1	14.541 1	13.469 7	10.774 2
Case 2	14.305 8	13.122 4	10.019 4
Case 3	14.174 0	12.882 4	9.522 1

由两表数据分析可知: 在同一负荷水平下, Case 1 系统换流母线的 MVSF 最小, 其电压稳定性最强, Case 2 系统次之, Case 3 系统最弱; 随着负荷增加, 三种情况换流母线的特征值依次减小, 表明电压稳定性变弱, 并且后两种情况受负荷变化影响较大。

5.2 时域仿真分析

假设 3 种情况均在负荷水平: $S_9 = 17.67 + j1.0$ 的运行条件下, 线路 L_{89} 的首端发生三相瞬时接地短路, 0.12 s 后切除故障, 其换流母线的电压波形分别如图 3~图 5 所示。

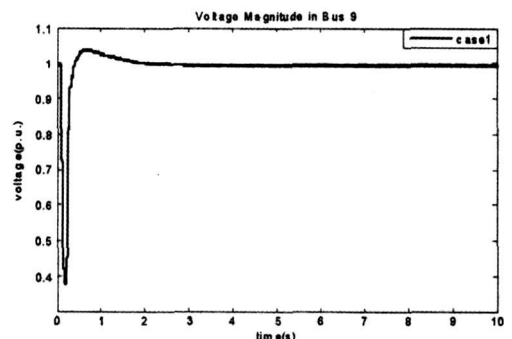


图 3 情况 1 换流母线的电压波形 (负荷水平 2)

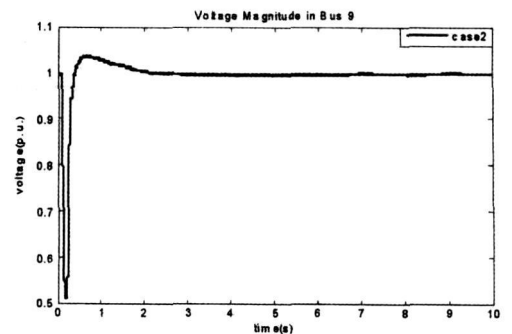


图 4 情况 2 换流母线的电压波形 (负荷水平 2)

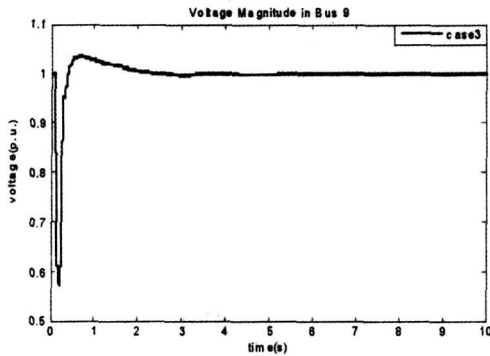


图 5 情况 3 换流母线的电压波形 (负荷水平 2)

由图 3~图 5 中的电压波形比较可知:在此负荷水平条件下,系统经受扰动后,母线电压很快能恢复正常,稳定性都很强。

另外,在负荷水平 $S_{9} = 19.437 + j1.1$ 运行条件下,施加同样的扰动,换流母线电压波形如图 6~图 8 所示。

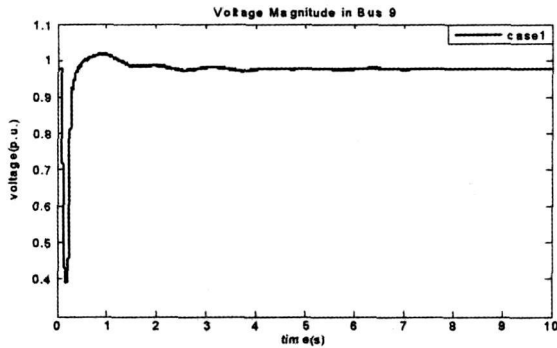


图 6 情况 1 换流母线的电压波形 (负荷水平 3)

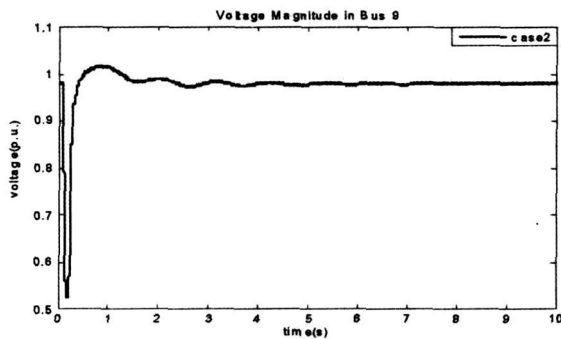


图 7 情况 2 换流母线的电压波形 (负荷水平 3)

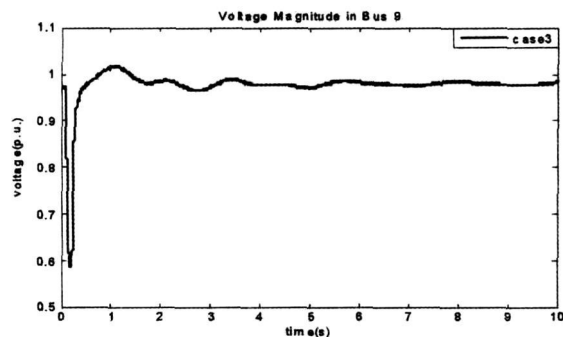


图 8 情况 3 换流母线的电压波形 (负荷水平 3)

比较图 6~图 8 可知:系统在重负荷运行条件下, Case 2 和 Case 3 的换流母线电压稳定性有所减弱,尤其是 Case 3,电压波动明显增大;但 Case 1 变化不大。这说明弱并联交流系统受负荷水平影响较大,不利于换流母线的电压稳定性。总体来说,在同一负荷水平下,这 3 种情况的稳定性依次减小。

6 结 论

通过相关的静态分析和动态仿真讨论了并联交流系统强度对逆变侧换流母线电压稳定性的影响,得出以下结论。

(1) 并联交流系统强度越大,则系统短路比越大,换流母线的稳定裕度越大;

(2) 随着负荷的增加,换流母线的电压灵敏度增大,系统趋于不稳定;

(3) 弱并联交流系统受负荷水平影响较大,不利于换流母线的电压稳定性;

(4) 在一定的直流控制方式下,提高并联交流系统强度,使得对受端交流系统的功率支援增大,从而加强交流系统对直流系统的无功支持,有助于提高换流母线的电压稳定性。

参 考 文 献

- [1] Ainsworth J D, Gavrilovic A, Thanawala H L. Static and synchronous compensators for HVDC transmission converters connected to weak AC systems [A]. International Conference on Large High Voltage Electric Systems [C]. International Conference on Large High Voltage Electric Systems Paris Fr, 1980.
- [2] Hammad A E. A computation algorithm for assessing voltage stability at AC/DC interconnections [J]. IEEE Trans on Power PWRS 1986, 1(1), 209-216.
- [3] Denis Lee Hau Aik, Andersson G. Influence of Load Characteristics on the Power/Voltage Stability of HVDC Systems Part 1: Basic Equations and Relationships [J]. IEEE Trans on Power Delivery 1998, 13(4), 1437-1444.
- [4] Denis Lee Hau Aik, Andersson G. Influence of Load Characteristics on the Power/Voltage Stability of HVDC Systems Part 2: Stability Margin Sensitivity [J]. IEEE Trans on Power Delivery 1998, 13(4), 1445-1452.

(下转第 35 页)

4 结 语

采用 PSO 算法对灰微分方程的参数进行直接求解,不需构造背景值,提高了模型的拟合和预测精度,增强了模型的适用性。将 PSOGM (1, 1, a, b, c) 模型分别应用于增长规律不同的四种电力负荷的预测问题中,预测精度明显优于传统 GM (1, 1) 模型; PSOGM (1, 1, a, b, c) 模型可以精确地预测具有近似指数增长规律的负荷,它不仅适用于变化平稳的历史负荷序列,还适用于负荷增长率较大的负荷序列,克服了 GM (1, 1) 模型的局限性,具有一定的应用价值。本算法的特点一是算法简单。首先,粒子群算法用于灰色模型参数的直接求解,无需像遗传算法那样进行复杂编码,可直接对实数变量进行操作;其次,算法中需要调整参数很少,即使调整也不需要太多经验。二是收敛快、精度高。粒子群算法收敛快是其重要特性,也是其近年来发展迅速的一个重要原因。

参 考 文 献

[1] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 湖北, 华中理工大学出版社, 1992.
 [2] Ni Dongxiao. "Adjustment gray model for load forecasting of power system." The Journal of Gray System, vol 6,

no 2, pp 127-134, 1994.
 [3] 牛东晓, 赵磊. 粒子群优化灰色模型在负荷预测中的应用 [J]. 中国管理科学, 2007, 15(1): 69-73.
 [4] 王翠茹, 孙辰军, 杨静, 冯海迅. 改进残差灰色预测模型在负荷预测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 86-89.
 [5] 宋中民. 灰色 GM (1, 1) 模型参数的优化方法 [J]. 烟台大学学报, 2001, 14 (3): 161-163.
 [6] J Kennedy and R. C Eberhart "Particle swarm optimization Proc IEEE Int Conf Neural Networks Piscataway NJ IEEE Press 1995, pp 1942-1948.
 [7] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法 [M], 北京, 科学出版社, 2004.
 [8] 王成山, 杨军, 张崇见. 灰色系统理论在城市年用电量预测中的应用—不同预测方法的分析比较 [J]. 电网技术, 1999, 23(2): 15-18.
 [9] 牛东晓, 曹树华, 赵磊. 电力负荷预测技术及其应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

作者简介:

周在阳 (1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化及计算机信息管理。

周步祥 (1965—): 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的教学与科研工作。

(收稿日期: 2008-12-10)

(上接第 8 页)

[5] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Quasi-Static Stability of HVDC Systems Considering Dynamic Effects of Synchronous Machines and Excitation Voltage Control [J], IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1501-1514.
 [6] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Nonlinear Dynamics in HVDC Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1417-1426.
 [7] Canizares C A Alvarado F L Point of Collapse and Continuation Method for Large AC/DC Systems [J], IEEE Trans on PWRs 1993, 8(1): 1-7.
 [8] Kundur P. Power System Stability and Control McGraw-Hill Inc, New York 1994.
 [9] Senlyen A Gao B Calculation of the Extreme Loading Condition of A Power System for the Assessment of Voltage Stability [J], IEEE Trans on PWRs 1991, 6(1): 307-315.
 [10] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定 [J]. 中国电机工学报. 1993, 13(6): 40-45.

[11] 张尧, 宋文南, 贺家李. 临近电压稳定极限的潮流和静稳极限算法 [J]. 中国电机工学报. 1994, 14(6): 17-23.
 [12] Denis Lee Hau Aik Andersson G. Voltage Stability Analysis of Multi-Infed HVDC Systems [J], IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1316.
 [13] CIGRE Task Force 38.02.11 CIGRE Technical Brochure: Indices Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomenon. Electra 1995(159): 135-147.

作者简介:

徐梅梅 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析计算及稳定。

李兴源 (1945—), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作。

白加林 (1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。

贺洋 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析计算及稳定。

(收稿日期: 2008-12-15)