

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.03.004

# 相邻两节点等值算法在复杂电网简化中的应用

李洪兵, 李志勇, 穆子龙, 廖玉祥

(国网重庆市电力公司 江北供电分公司, 重庆 401147)

**摘要:** 实际电力系统呈现非辐射状网络的特点, 评估研究其稳定性往往需要建立电磁暂态仿真模型, 这就要求首先对系统进行简化等值。采用考虑了等值节点之间耦合阻抗的相邻两节点等值算法, 成功实现了对实际复杂大电网的简化建模。德宝高压直流输电系统和南方某实际超高压交流输电系统的仿真分析表明, 等值后系统的静态性能与原系统一致, 同时也具备比较接近的动态响应, 满足等值要求, 为后续稳定性的相关研究奠定基础。

**关键词:** 大系统等值; 等值电路; 相邻两节点等值; 暂态分析

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)03-023-06

## The application to simplify the complicated power grid through adjacent two-node equivalent method

LI Hongbing, LI Zhiyong, MU Zilong, LIAO Yuxiang

(Jiangbei Power Supply Bureau of Chongqing Electric Power Corp. of State Grid, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Most real power systems are not radial networks and evaluation of the stability often needs to establish electromagnetic transient simulation models. So the network equivalent is required first and foremost. The adjacent two-node equivalent method, which considers the coupling impedance between equivalent nodes, is used to realize the simplification and modeling to complex power grid. The analysis and simulation on both the HVDC system from Deyang to Baoji and a real extra-high voltage AC transmission system in South China shows that the static performance of the simulated system by using the adjacent two-node equivalent method is completely equivalent to the original one, as well as the performance of dynamic equivalent is in a satisfied level. Thus the transient system model simplified can be well established to support research of power grid's security and stability.

**Key words:** large power system equivalent; equivalent circuits; adjacent two-node equivalent; transient analysis

随着建设有中国特色的坚强智能电网发展战略<sup>[1]</sup>的确立和深入实施, 中国各大区域间正在形成巨大的互联电网<sup>[2-3]</sup>, 比如三华电网(华北—华中—华东互联网), 这样能提高电能质量, 保障较高的

供电可靠性, 亦能提升电网经济运行的能力。不过, 对电网各种运行方式进行安全稳定评估<sup>[4]</sup>的复杂程度却随着电网规模的不断扩大而迅速增加, 常常受到计算机存储容量的限制, 而且耗费过长时间<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期: 2013-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51037003)

作者简介: 李洪兵(1966-), 男, 国网重庆市电力公司江北供电分公司高级工程师, 研究方向为电力系统状态检测。

穆子龙(1985-), 男, 通讯作者, 四川大学博士, 国网重庆市电力公司江北供电分公司工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、继电保护, (E-mail)zilongallon@163.com。

尤其当需要借助电磁暂态仿真模型<sup>[7-8]</sup>研究次同步振荡<sup>[9-10]</sup>、谐波不稳定<sup>[11]</sup>这一类电网稳定问题时,如果采用大规模交直流互联系统完全详细的模型,必将十分复杂和耗时,且无必要。因此,需要对大系统实施等值简化。

电力系统外部静态等值方法主要有 Ward 等值<sup>[12]</sup>、REI 等值<sup>[13-14]</sup>以及戴维南等值<sup>[15-16]</sup>等。根据 Ward 等值算法,等值阻抗的计算结果中常常出现负值,但电磁暂态仿真程序,如 EMTDC,通常都要求其中的参数能代表实际情况,即要求阻抗为正,这就导致程序无法运行。如果采用 REI 等值方法,计算过程中会涉及对网络导纳矩阵的大量修改与计算<sup>[17]</sup>,非常复杂。戴维南等值方法能够避开网络的反复简化过程,计算量比较小,速度也比较快,例如文献<sup>[18]</sup>提出的基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法和文献<sup>[19]</sup>提出的两点潮流法,不过,仅适用于在辐射状电网中进行单点等值简化。对于复杂电力系统,网络往往不是辐射状,呈现环状的特点,常常会遇到两个相邻等值节点的电气距离相当近的情况。此时,二者的耦合程度就会比较强,它们之间的耦合阻抗将对边界节点处的短路电流产生显著的影响,而这个短路电流水平表征了系统强度的大小,决定着等值后系统能否正确反映出等值前系统的关键特性。因此,需要在这两个相邻节点处同时进行等值,并计算耦合阻抗,从而避免出现等值前后系统的线路潮流、节点电压、短路容量等关键指标偏差较大,掩盖原本存在的稳定问题的情况。文献<sup>[20]</sup>提出一种基于网络拓扑理论和潮流解的等值方法,考虑了等值节点间的耦合阻抗,并以 IEEE30 母线系统为例进行了仿真分析,不过没有涉及到实际大系统的简化等值。

笔者针对实际大系统非辐射状网络的特点,采用文献<sup>[20]</sup>提出的相邻两节点等值算法实现了环网的简化等值。德阳—宝鸡±500 kV 高压直流输电系统和南方某实际超高压交流输电系统的仿真分析均表明,由该算法计算得到的等值后系统,其静态和动态性能与原系统都很相近,满足等值要求。

## 1 相邻两节点等值算法

在环形电网中,某时刻从两个相邻节点同时向电网内部看去,可将其等效为由电压源经过等值阻抗向被研究的部分供电的系统,如图 1 所示。

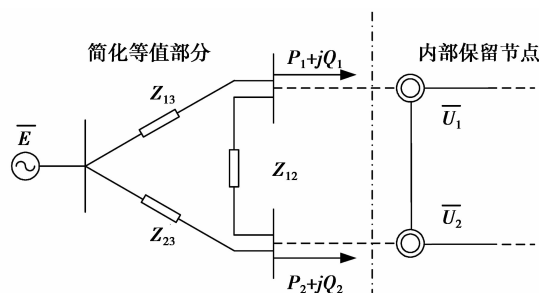


图 1 等值示意图

图 1 中, $\bar{E}$  代表等值电势, $Z_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) 为节点 1、2 与等值电源之间的互阻抗, $P_i$  ( $i=1, 2$ ) 表示在对应边界节点处由简化等值部分流入内部保留节点的有功功率, $Q_i$  ( $i=1, 2$ ) 为无功功率, $\bar{U}_i$  ( $i=1, 2$ ) 为对应节点  $i$  的电压。以等值电势  $\bar{E}$  为参考,列写节点导纳矩阵,得

$$\begin{bmatrix} Y_{12} + Y_{13} & -Y_{12} \\ -Y_{12} & Y_{12} + Y_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 - \bar{E} \\ \bar{U}_2 - \bar{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^* / \bar{U}_1^* \\ S_2^* / \bar{U}_2^* \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $Y_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) 为节点  $i, j$  与等值电源之间的互导纳; $\bar{I}_i$  ( $i=1, 2$ ) 表示从简化等值部分流向相应边界节点的电流; $\bar{U}_i^*$  和  $S_i^*$  ( $i=1, 2$ ) 分别表示节点电压、视在功率的共轭。

在直角坐标下,各电压和导纳可表示为

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = e_1 + jf_1; \bar{U}_2 = e_2 + jf_2; \bar{E} = e_3 + jf_3; \\ Y_{12} = G_{12} + jB_{12}; Y_{13} = G_{13} + jB_{13}; Y_{23} = G_{23} + jB_{23}. \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中,分离实部和虚部后,整理得到

$$\left. \begin{cases} \bar{I}_{1re} = (G_{12}e_{12} + G_{13}e_{13}) - (B_{12}f_{12} + B_{13}f_{13}), \\ \bar{I}_{1im} = (G_{12}f_{12} + G_{13}f_{13}) + (B_{12}e_{12} + B_{13}e_{13}), \\ \bar{I}_{2re} = (G_{12}e_{21} + G_{23}e_{23}) - (B_{12}f_{21} + B_{23}f_{23}), \\ \bar{I}_{2im} = (G_{12}f_{21} + G_{23}f_{23}) + (B_{12}e_{21} + B_{23}e_{23}). \end{cases} \right\} \quad (3)$$

式中  $e_{ij} = e_i - e_j$ ,  $f_{ij} = f_i - f_j$ ,  $i \neq j$ 。

式(3)中, $G_{12}$ ,  $B_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $B_{13}$ ,  $G_{23}$ ,  $B_{23}$ ,  $e_3$  和  $f_3$  为未知数,共计 8 个,但只有 4 个方程,不能得到准确解。因此,在系统稳定运行点附近线性化一次,即微调边界节点处的有功负荷或者无功负荷,然后重新计算系统潮流,就能再得到 4 个方程,如式(4)所示。联立

式(3)和式(4)这 8 个方程,就能求出 8 个未知数。

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}'_{1re} &= (G_{12}e'_{12} + G_{13}e'_{13}) - (B_{12}f'_{12} + B_{13}f'_{13}), \\ \bar{I}'_{1im} &= (G_{12}f'_{12} + G_{13}f'_{13}) + (B_{12}e'_{12} + B_{13}e'_{13}), \\ \bar{I}'_{2re} &= (G_{12}e'_{21} + G_{23}e'_{23}) - (B_{12}f'_{21} + B_{23}f'_{23}), \\ \bar{I}'_{2im} &= (G_{12}f'_{21} + G_{23}f'_{23}) + (B_{12}e'_{21} + B_{23}e'_{23}). \end{aligned} \right\} (4)$$

此方法属于电力系统静态等值的范畴,一旦系统运行方式变化,等值参数也应发生相应改变,需要重新计算。这里,采用牛顿法求解式(3)和式(4),以求更方便地进行等值简化,从而更好地匹配运行工况的改变。

由式(3)和式(4)可得

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Delta I}_{1re} &= I_{1res} - (G_{12}e_{12} + G_{13}e_{13}) + (B_{12}f_{12} + B_{13}f_{13}) = 0, \\ \bar{\Delta I}_{1im} &= I_{1ims} - (G_{12}f_{12} + G_{13}f_{13}) - (B_{12}e_{12} + B_{13}e_{13}) = 0, \\ \bar{\Delta I}_{2re} &= I_{2res} - (G_{12}e_{21} + G_{23}e_{23}) + (B_{12}f_{21} + B_{23}f_{23}) = 0, \\ \bar{\Delta I}_{2im} &= I_{2ims} - (G_{12}f_{21} + G_{23}f_{23}) - (B_{12}e_{21} + B_{23}e_{23}) = 0, \\ \bar{\Delta I}'_{1re} &= I'_{1res} - (G_{12}e'_{12} + G_{13}e'_{13}) + (B_{12}f'_{12} + B_{13}f'_{13}) = 0, \\ \bar{\Delta I}'_{1im} &= I'_{1ims} - (G_{12}f'_{12} + G_{13}f'_{13}) - (B_{12}e'_{12} + B_{13}e'_{13}) = 0, \\ \bar{\Delta I}'_{2re} &= I'_{2res} - (G_{12}e'_{21} + G_{23}e'_{23}) + (B_{12}f'_{21} + B_{23}f'_{23}) = 0, \\ \bar{\Delta I}'_{2im} &= I'_{2ims} - (G_{12}f'_{21} + G_{23}f'_{23}) - (B_{12}e'_{21} + B_{23}e'_{23}) = 0. \end{aligned} \right\} (5)$$

式中:  $I_{1res}, I_{2res}, I_{1ims}, I_{2ims}, I'_{1res}, I'_{2res}, I'_{1ims}$  和  $I'_{2ims}$  分别表示在线性化前后,两次潮流计算各自求出的从简化等值部分流向相应边界节点的电流实部与虚部。

利用泰勒级数将方程组(5)中各式展开,略去二阶及以上高阶项,可得修正方程式为

$$\begin{bmatrix} \bar{\Delta I}_{re} \\ \bar{\Delta I}_{im} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{L} & \mathbf{M} & \mathbf{N} \\ -\mathbf{L} & \mathbf{H} & -\mathbf{N} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{B} \\ \Delta \mathbf{e}_3 \\ \Delta \mathbf{f}_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中  $\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{L} & \mathbf{M} & \mathbf{N} \\ -\mathbf{L} & \mathbf{H} & -\mathbf{N} & \mathbf{M} \end{bmatrix}$  为 Jacobi 矩阵,如果运行方式发生改变,只需修改该矩阵,便能便捷地完成等值参数的更新。

$$\bar{\Delta \mathbf{I}}_{re} = [\bar{\Delta I}_{1re} \quad \bar{\Delta I}_{2re} \quad \bar{\Delta I}'_{1re} \quad \bar{\Delta I}'_{2re}]^T,$$

$$\bar{\Delta \mathbf{I}}_{im} = [\bar{\Delta I}_{1im} \quad \bar{\Delta I}_{2im} \quad \bar{\Delta I}'_{1im} \quad \bar{\Delta I}'_{2im}]^T,$$

$$\Delta \mathbf{G} = [\Delta G_{12} \quad \Delta G_{13} \quad \Delta G_{23}]^T,$$

$$\Delta \mathbf{B} = [\Delta B_{12} \quad \Delta B_{13} \quad \Delta B_{23}]^T,$$

$$\mathbf{H} = \frac{\partial \bar{\Delta \mathbf{I}}_{re}}{\partial \Delta \mathbf{G}} = \frac{\partial \bar{\Delta \mathbf{I}}_{im}}{\partial \Delta \mathbf{B}} = \begin{bmatrix} -e_{12} & -e_{13} & 0 \\ -e_{21} & 0 & -e_{23} \\ -e'_{12} & -e'_{13} & 0 \\ -e'_{21} & 0 & -e'_{23} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L} = \frac{\partial \bar{\Delta \mathbf{I}}_{re}}{\partial \Delta \mathbf{B}} = -\frac{\partial \bar{\Delta \mathbf{I}}_{im}}{\partial \Delta \mathbf{G}} = \begin{bmatrix} f_{12} & f_{13} & 0 \\ f_{21} & 0 & f_{23} \\ f'_{12} & f'_{13} & 0 \\ f'_{21} & 0 & f'_{23} \end{bmatrix},$$

## 2 仿真测试系统简介

### 2.1 德宝直流输电系统简介

德阳—宝鸡直流输电系统是华中电网与西北电网的联网工程,通过联网可以实现水火互补,南北共济,在取得巨大经济效益的同时,加强区域间电网的联系和稳定性。

对于丰水期德宝直流送端——四川电网(送端 500 kV 线路示意图如图 2 所示)的次同步振荡问题的研究,如要建立交直流全电磁暂态仿真模型,必将非常复杂,而且耗时甚巨,且无必要,因而对送端交流系统进行简化等值。其中,以川绵阳和谭家湾为边界节点,等值后系统拓扑如图 3 所示。

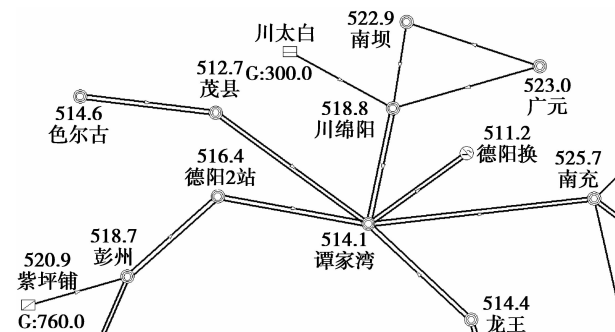


图 2 德宝直流送端 500 kV 线路简化示意图

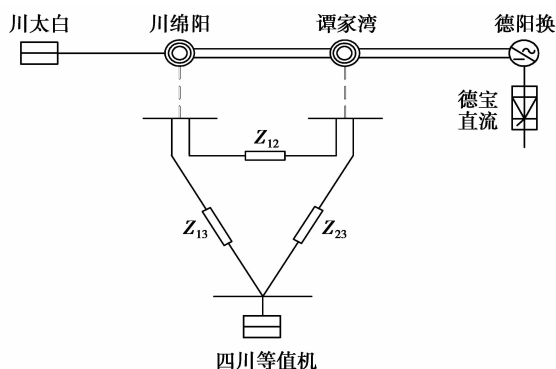


图 3 等值后的德宝直流送端系统拓扑图

### 2.2 南方某实际超高压交流输电系统简介

如图 4 所示为南方某 500 kV 交流输电系统, 如要研究串补与火电机组之间的次同步谐振问题, 需要建立电磁暂态模型, 同样需要对交流电网进行等值简化。

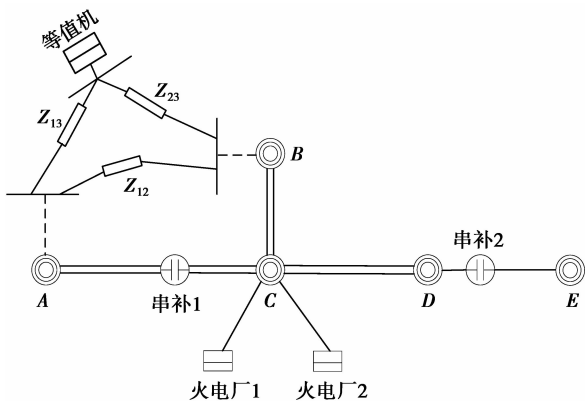


图 4 等值后的交流系统拓扑图

## 3 仿真测试分析

等值步骤如下:

1) 潮流计算, 分别求出川绵阳、谭家湾、节点 A 和节点 B 的电压  $\bar{U}_1, \bar{U}_2$  以及对应边界节点处的功率交换  $P_1, Q_1, P_2, Q_2$ 。

2) 在系统运行点附近进行线性化, 即稍微加大在川绵阳、节点 A 处的无功负荷, 再计算一次潮流, 得到线性化后川绵阳、谭家湾、节点 A 和节点 B 所对应的电压  $\bar{U}'_1, \bar{U}'_2$  以及边界节点处的功率交换  $P'_1, Q'_1, P'_2, Q'_2$ 。

3) 将导纳  $G_{12}, B_{12}, G_{13}, B_{13}, G_{23}$  和  $B_{23}$  的初值设为 1。

4) 将等值电势的初值  $e_3, f_3$  设为平均额定电压。

5) 将各初值代入式(5)中, 开始迭代计算。

为了尽量降低随机噪声的干扰, 并减少计算过

程产生的误差, 多次增减川绵阳、谭家湾、节点 A 和节点 B 的有功或无功负荷, 分别计算, 最后求取平均值。计算结果如下。

对于仿真系统 1, 有

$$\begin{cases} \bar{E} = 515.8855 \angle -8.5499^\circ, \\ \begin{bmatrix} Z_{12} \\ Z_{13} \\ Z_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.1705 \\ 2.1176 \\ 2.0103 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 256.2597 \\ 45.6125 \\ 15.7928 \end{bmatrix} \end{cases}.$$

对于仿真系统 2, 有

$$\begin{cases} \bar{E} = 539.8771 \angle 8.2678^\circ, \\ \begin{bmatrix} Z_{12} \\ Z_{13} \\ Z_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.7716 \\ 2.1024 \\ 1.9908 \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 166.2703 \\ 27.9956 \\ 17.8431 \end{bmatrix} \end{cases}.$$

等值前后, 内部保留节点的电压、相关线路的潮流分布以及边界节点处的三相短路电流水平分析比较如表 1~3 所示。

表 1 节点电压分析比较

节点	等值前/ (p. u. · (°) <sup>-1</sup> )	等值后/ (p. u. · (°) <sup>-1</sup> )
川太白	1.038/22.0	1.037/22.0
川绵阳	1.037/21.1	1.035/21.0
谭家湾	1.028/19.8	1.026/19.7
德阳换	1.022/18.7	1.022/18.5
A	1.040/16.2	1.039/16.3
B	1.021/16.0	1.022/16.0
C	1.029/15.3	1.028/15.1
D	1.026/14.5	1.026/14.6
E	1.028/13.6	1.028/13.5

表 1 表明, 等值以后系统各节点电压与等值前基本保持一致。

表 2 潮流分布分析比较

线路	等值前/(MV · A)	等值后/(MV · A)
川太白—川绵阳	299.9-j35.3	300.7-j30.8
川绵阳—谭家湾	864.0+j60.8 (* 2)	870.1+j62.6 (* 2)
谭家湾—德阳换	3 020.4-j100.0 (* 2)	3 026.0-j95.8 (* 2)
A—C	937.3+j66.7 (* 2)	935.0+j64.6 (* 2)
B—C	329.3-j30.2 (* 2)	333.1-j18.6 (* 2)
C—D	486.8-j43.8 (* 2)	481.2-j37.7 (* 2)
D—E	962.0+j39.6	956.8+j36.0

表 2 表明等值后相关线路的潮流分布和等值前基本保持一致。

表 3 边界节点处的短路电流水平分析比较

边界节点	等值前/ kA	等值后/ kA	误差/ %
川绵阳	18.54	18.15	2.10
谭家湾	30.38	30.08	0.99
A	19.11	18.33	4.08
B	25.43	24.69	2.91

表 3 表明,等值后边界节点处的三相短路电流水平和等值前相比较,误差很小(5%以内),满足等值要求。

由表 1~3 可知,等值前后系统的静态性能基本保持一致。

等值前后系统经历大扰动的响应情况对比如下。

对于仿真测试系统 1,故障设置为 2 s 时,谭家湾—德阳换流站甲线谭家湾侧发生三相永久短路故障,2.1 s 时线路两侧的断路器同时三相跳闸切除线路。仿真结果如图 5 和图 6 所示。

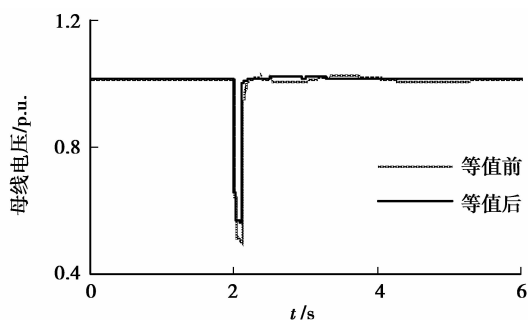


图 5 川绵阳母线电压对比

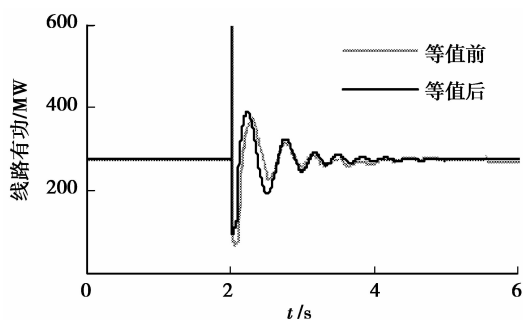


图 6 线路川太白—川绵阳有功对比

对于仿真测试系统 2,故障设置为 2 s 时,线路 AC 甲线在串补 1 处发生三相永久短路故障,2.1 s 时线路两侧断路器同时跳闸切除线路。仿真结果如图 7 和图 8 所示。

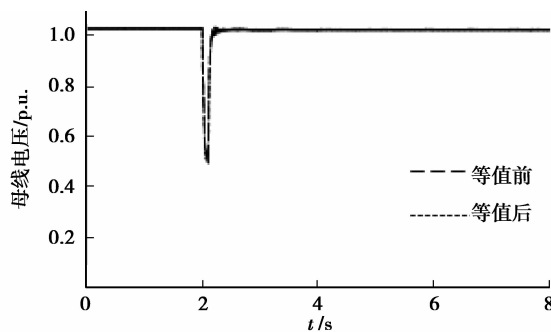


图 7 母线 D 电压对比

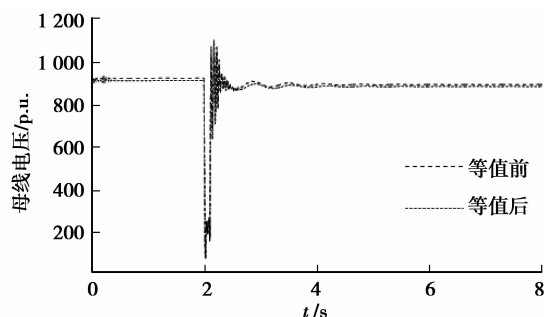


图 8 线路 DE 有功对比

通过对母线电压和线路有功对于三永故障的动态响应进行对比分析可知,等值前后系统经历大扰动的时域响应曲线基本一致,说明等值前后,两系统的动态性能相近,满足等值要求,从而在简化系统上进行后续分析研究是合适的。

## 4 结 语

笔者针对德宝直流输电系统和南方某实际超高压交流输电系统非辐射状网络的现实,采用考虑了等值节点间耦合阻抗对系统强度的影响的相邻两节点等值算法实现复杂电力系统的等值简化。

两个仿真系统的测试结果都表明,等值前后,系统的静态性能基本保持一致,同时,动态性能也得到了适度的保证,在大扰动下的时域响应亦比较接近。准确性满足要求的大系统暂态仿真等值模型的建立,为进一步实现交直流互联电网的后续相关安全稳定评估打下了坚实基础。

### 参考文献:

[1] 刘振亚. 落实科学发展观加快建设坚强的国家电网[N]. 中国电力报,2005-02-24(1).  
 [2] 张文亮,胡毅. 发展特高压交流输电,促进全国联网[J]. 高电压技术,2003,29(8):20-22.  
 ZHANG Wenliang, HU Yi. To develop UHV AC power transmission and advance the united power network in China [J]. High Voltage Engineering, 2003,29(8):20-22.

- [3] 余贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):6-11.  
YU Yixin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(11): 6-11.
- [4] 芦晶晶,沈力,李柏青,等. 电网频率崩溃的可靠性评估模型[J]. 重庆大学学报,2012,35(2):22-27.  
LU Jingjing, SHEN Li, LI Boqing, et al. Research on reliability evaluation model for frequency collapse of power grid [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(2): 22-27.
- [5] 石辉,张勇军,徐涛. 我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(24):242-247.  
SHI Hui, ZHANG Yongjun, XU Tao. Survey of response to LFO under the background of China smart grid [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 242-247.
- [6] 王路,李兴源,颜泉,等. 复杂交直流系统的双时标混合协调仿真[J]. 电力系统自动化,2005,29(22):28-32.  
WANG Lu, LI Xingyuan, YAN Quan, et al. Hybrid dual-time scale simulation technology for complex AC-DC power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 28-32.
- [7] 王晶芳,王智冬,李新年,等. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真[J]. 电力系统自动化,2007,31(11):97-102.  
WANG Jingfang, WANG Zhidong, LI Xinnian, et al. Simulation to study the dynamic performance of multi-infeed AC/DC power systems including UHVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 97-102.
- [8] 张树卿,梁旭,童陆园,等. 电力系统电磁/机电暂态实时混合仿真的关键技术[J]. 电力系统自动化,2008,32(15):89-96.  
ZHANG Shuqing, LIANG Xu, TONG Luyuan, et al. Key technologies of the Power System electromagnetic/electromechanical real-time hybrid simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 89-96.
- [9] 张远取,谢小荣,姜齐荣. 应用附加励磁阻尼控制抑制 HVDC 引起的次同步振荡[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(4):1-5.  
ZHANG Yuanqu, XIE Xiaorong, JIANG Qirong. Application of supplementary excitation damping control for suppression of subsynchronous oscillation caused by HVDC [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 1-5.
- [10] 徐衍会. 复杂多机系统次同步振荡的分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(11):83-89.  
XU Yanhui. Analysis and damping of subsynchronous oscillation in complex multi-machine system [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 83-89.
- [11] 穆子龙,李兴源. 交、直流输电系统相互影响引起的谐波不稳定问题[J]. 电力系统自动化,2009,33(2):96-100.  
MU Zilong, LI Xingyuan. Harmonic instability caused by interactions between AC and DC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 96-100.
- [12] Ward J B. Equivalent circuits for power-flow studies[J]. Electrical Engineering, 1949, 68(9): 794.
- [13] Kato K, Snyder W, Vemuri S, et al. External network modelling—recent practical experience [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 216-228.
- [14] Deckmann S, Pizzolante A, Monticelli A, et al. Studies on power system load flow equivalencing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1980: 2301-2310.
- [15] Chebbo A M, Irving M R, Sterling M J H. Voltage collapse proximity indicator: behavior and implications[J]. IEEE Proceedings-C: Generation Transmission and Distribution, 1992, 139(3): 241-252.
- [16] Begovic M, Milošević B, Novosel D. A novel method for voltage instability protection [C] // Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences, January 7-10, 2002, Hawaii. Piscataway: IEEE Press, 2002: 802-811.
- [17] 余贻鑫,陈礼义. 电力系统的安全性和稳定性[M]. 北京:科学出版社,1988.
- [18] 汤涌,孙华东,易俊,等. 基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(13):48-53.  
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for thevenin equivalent parameters based on complete differential equation [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(13): 48-53.
- [19] 付英,李兴源,宋永华. 基于静态等值的在线实时电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化,1997,21(11):25-28.  
FU Ying, LI Xingyuan, SONG Yonghua. Static equivalence based on-line real-time voltage stability analysis. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(11): 25-28.
- [20] 穆子龙,李兴源,刘一民,等. 电力系统相邻两节点同时等值的方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(20):32-37.  
MU Zilong, LI Xingyuan, LIU Yimin, et al. A simultaneous equivalent method for two adjacent nodes in power grid [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 32-37.