

# 小阻抗支路对潮流计算收敛性的影响和处理

韩平<sup>1</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>, 吴琼<sup>2</sup>, 王智冬<sup>3</sup>, 王腊梅<sup>4</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 华能国际电力股份有限公司, 北京 100031;  
3. 国网北京经济技术研究院, 北京 100761; 4. 江西九江供电公司, 江西 九江 332000)

**摘要:** 常规潮流算法在应用于含小阻抗支路电网的计算中存在收敛性问题。通过对含小阻抗支路电网算例的试算分析发现, 在当前普通个人计算机性能条件下, 使用双精度类型变量, 利用高斯塞德尔法迭代两次选取初值后再使用牛顿拉夫逊法, 不需要附加处理就可以解决含小阻抗支路电网潮流计算收敛性问题。将该方法应用于三个地区级电网能量管理系统的调度员潮流计算模块, 表明所提方法对于解决实际问题的可行性和有效性。

**关键词:** 潮流计算; 牛顿拉夫逊法; 高斯塞德尔法; 小阻抗支路

## Influence and processing of small impedance branches on the convergence of load flow calculation

HAN Ping<sup>1</sup>, LIU Wen-ying<sup>1</sup>, WU Qiong<sup>2</sup>, WANG Zhi-dong<sup>3</sup>, WANG La-mei<sup>4</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Huaneng Power International Inc, Beijing 100031, China; 3. State Power Economic Research Institute, Beijing 100761, China; 4. Jiujiang Power Supply Company, Jiujiang 332000, China)

**Abstract:** There is convergence problem in the load flow calculation with small impedance branches. It is found that using double type variations and the approach which are using Gauss-Seidel method twice to choose initial numbers and then using Newton-Raphson method in the ordinary person computer can solve the convergence problem without any additional conditions, after the analysis of the calculating experiment of the practical project with small impedance branches. Calculation on three examples of practical regional Power Grid EMS proves the feasibility and the validity of the proposed approach.

**Key words:** load flow calculation; Newton-raphson method; Gauss-seidel method; small impedance branch

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0017-03

## 0 引言

潮流计算是电力系统稳态分析中的重要内容, 也为一些电力系统暂态和动态分析提供初始断面。

多篇文献提到: 常规潮流算法在遇到含小阻抗支路电网计算时存在收敛性的问题。

在实际电网中, 小阻抗支路是较普遍存在的。它可能出现在以下三种情况中: (1) 三绕组变压器在实际计算中等效为三个两绕组的模型参与计算, 往往其中一个绕组的阻抗特别小; (2) 在发电厂或变电站电气主接线中, 常出现双母或单母分段的接线方式, 当双母并列运行时, 需要得到母联开关的电流值, 此时可以把其作为一个小阻抗支路处理; (3) 由于超高压线路对地电容相对较大且其传输功率一般小于其自然功率, 造成线路末端电压大于始端电

压, 需在线路两端断路器外侧加装电抗器, 为描述这种情况, 在加装电抗器处设置一个节点, 在该节点与出线母线间就形成了小阻抗支路。今后我国特高压线路网架建成后, 该问题将显得更加突出。因此, 针对于潮流计算中的小阻抗支路处理的研究具有非常重要的意义。

## 1 研究现状

文献[1]对使用牛顿拉夫逊法计算小阻抗网络进行了研究, 提出其造成潮流不收敛的原因因为雅可比矩阵的数值条件变差。

文献[2]提出将小阻抗支路用两条电抗值互为相反数的支路串联来表示, 其中其串联后的阻抗与原小阻抗支路的阻抗相等。这种方法的缺点是对每条小阻抗支路增加了一个节点和一条支路, 增加了

网络的复杂度。

文献[3]提出针对牛顿拉夫逊法按适当策略修改迭代初值,并且按“使小阻抗支路流过功率为零”推导出的算式修改雅可比矩阵,使得在每步迭代过程中小阻抗支路两端节点电压的幅值、相角均相等的方法来处理。文献[4, 5]使用与文献[3]相同的思想,针对 PQ 分解法按适当的策略修改初值,并且按使小阻抗支路流过功率为零推导出的算式修改  $B'$  和  $B''$  矩阵,使得在每步迭代过程中小阻抗支路两端节点电压的幅值、相角均相等方法处理小阻抗支路。这两种方法的缺点是计算所得出的结果不够精确,而且遇到多条变压器小阻抗支路的情况需要重新推导公式,并需要加入特殊处理。

文献[6]提出先将小阻抗支路等价地转化为一个小阻抗和一个正常阻抗并联的形式,然后用附加节点注入功率来代替小阻抗的作用的方法处理(附加节点注入在计算不平衡功率时计入)。

文献[7]提出针对牛顿拉夫逊法,在生成雅可比矩阵时,一部分元素使用节点注入功率来代替节点计算功率参与计算。

上述文献提出的方法,都对潮流计算方法进行了附加处理,必然会增大潮流计算的计算时间。

### 2 小阻抗支路对潮流计算收敛性的影响及处理

小阻抗支路对潮流计算收敛性的影响有两方面<sup>[2,3]</sup>:一方面它的存在使得计算精度变差,另一方面它的存在使得潮流计算对电压初值的要求提高了。

#### 2.1 计算精度

小阻抗支路的存在造成雅可比矩阵数值条件变坏<sup>[1]</sup>,致使在每次迭代过程中解非线性方程组时会出现很小的数值,造成计算舍入误差对计算的影响变大,需要有效数字位数变长,因而潮流计算无法收敛。

有效数字位数与所使用变量的精度有关,双精度类型变量下的牛顿潮流计算程序能达到  $10^{-10}$  以上的计算精度,而单精度下仅能达到  $10^{-6}$  左右。

通过对处理含小阻抗支路电网算例的计算试验的分析发现,当使用双精度变量,目前普通个人计算机可以准确地处理含小阻抗电网的潮流计算。

#### 2.2 电压初值

小阻抗支路的存在,使得选取的电压初值对潮流计算收敛性的影响变大。而高斯赛德尔法对初值选择没有要求<sup>[8]</sup>,可以用来选择电压初值。

通过对处理含小阻抗支路电网算例的计算试

验的分析发现,利用高斯赛德尔法选择初值后再使用牛顿拉夫逊法,不需要附加处理就可以解决含小阻抗支路电网潮流计算收敛性问题。

### 3 标准算例

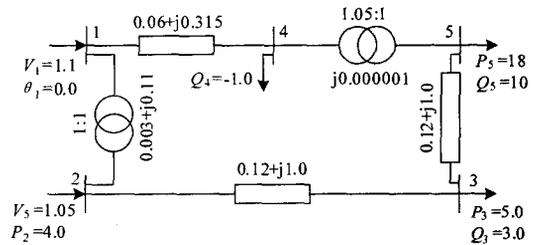


图1 5节点系统等值电路图

Fig.1 Equivalent circuit of the 5-bus system

算例 1<sup>[7]</sup>等值电路如图 1 所示。其中,支路 4-5 为小阻抗支路,阻抗值为 0.000 001。使用 CPU 为 AMD Athlon 2500+ 的计算机进行测试。当计算中变量类型使用 float 型时,使用极坐标下牛顿拉夫逊法计算发散;当变量类型使用 double 型时,使用极坐标下牛顿拉夫逊法收敛于不可行解,其中节点 4 和 5 的电压幅值分别为 0.000 003 和 0.000 008;当变量类型使用 double 型时,在使用高斯赛德尔法迭代两次获得初值后使用极坐标下牛顿拉夫逊法,经 3 次迭代计算获得正常解,节点 4, 5 的电压幅值分别为 1.100 462 和 1.048 059。

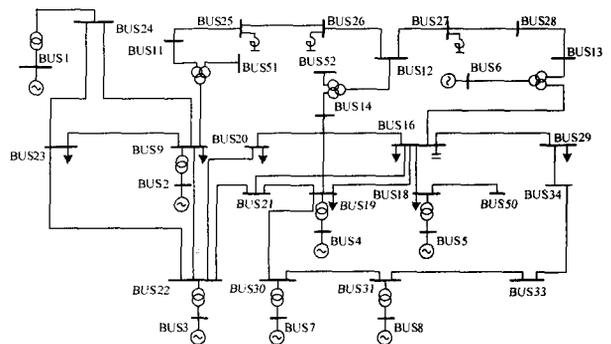


图2 36节点系统等值电路图

Fig.2 Equivalent circuit of the 36-bus system

考察算例2(算例数据来源于PSASP的36节点算例<sup>[9]</sup>),其等值电路如图2。其中含有7条小阻抗支路,如表1。

计算中变量类型使用double类型,当使用极坐标下牛顿拉夫逊法计算发散;而在两次高斯赛德尔法计算获得初值后使用极坐标下牛顿拉夫逊法时,

经6次迭代计算获得正确解。

表1 36节点系统小阻抗支路分布表

Tab.1 Distribution of small impedance branches in 36-bus system

索引	首端节点	末端节点	阻抗值
1	11	25	0.000 1
2	12	26	0.000 1
3	12	27	0.000 1
4	13	28	0.000 1
5	30	31	0.000 1
6	29	34	0.000 1
7	31	33	0.000 1

把这七条小阻抗支路的阻抗继续变小, 全部改为0.000 001, 使用两次高斯赛德尔法计算获得初值的极坐标下牛顿拉夫逊法仍然可以得到正常解。

从以上两个算例可见, 在当前普通个人计算机性能条件下, 选择足够精度的变量, 在使用高斯赛德尔法迭代两次选择电压初值后, 不需要附加处理, 牛顿拉夫逊法可以正确计算出含小阻抗支路网络的潮流分布。

#### 4 实际系统算例

在实际电网中, 需要获得变电站或发电厂电气主接线中的母联开关的电流值, 一般的处理是把两条母线作为一个节点进行潮流计算, 而后对其中一条母线使用基尔霍夫电流定律, 算得母联开关流过的功率和电流。在某一地区电网中, 某一变电站电气主接线使用双母分段形式, 且四个母联开关都闭合运行。在这种情况下使用上面提到的方法求取母联开关的电流将十分困难, 若把母联开关作为小阻抗支路参与计算可以解决这一问题。

以三个地区级电网的 EMS 高软分析数据为实验对象, 各取其一个时间断面作为实验数据。将母联开关全部设置为小阻抗支路, 其阻抗值当然可以使用母联开关电流值以及所联接两母线的电压值的历史数据计算得到。为了测试潮流程序对小阻抗支路的收敛性, 使用 0.000 01 作为其阻抗值。将双母线或分段母线形成两个拓扑节点, 使用本文提到的方法进行潮流计算, 计算结果如表 2 和表 3。

表2 实际系统计算结果1

Tab.2 Load flow calculation result 1 of real power grid

电网名称 系统名称	地区电网 1			地区电网 2
	定西变 330 kV 母线_岛	清水电站 1#发电机_岛	海甸峡 1#发电机_岛	靖远电厂 330 kV 虚拟母线_岛
结点数	73	20	41	373
支路数	84	19	47	430
小阻抗支路数	8	6	11	39
迭代次数	5	4	4	6

表3 实际系统计算结果2

Tab.3 Load flow calculation result 2 of real power grid

电网名称 系统名称	地区电网 3						
	乌审变电站 220 kV I 母线_岛	达拉特电厂 220 kV II 虚拟 母线_岛	薛家湾 110 kV I 母线_岛	杨四海 220 kV 母线_岛	布日都 110 kVII 工作母线 _岛	乌海变 220 kVIII 工作母线 _岛	乌海变 220 kVII 工作母线 _岛
结点数	137	50	19	31	19	73	37
支路数	145	53	18	36	20	78	38
小阻抗支路数	29	7	5	5	4	16	13
迭代次数	4	3	4	3	3	5	3

从表 2 和表 3 可以看出, 使用由高斯赛德尔法选择初值的极坐标下牛顿拉夫逊法可以解决实际系统中含小阻抗网络的潮流计算收敛性问题。

#### 5 结论

通过对大量含小阻抗支路电网算例的计算试验的分析发现, 在当前普通个人计算机性能条件下, 使用双精度类型变量, 通过利用两次高斯赛德尔法

选取初值后再使用牛顿拉夫逊法, 不需要任何附加处理, 就可以很好地解决普遍存在的含小阻抗支路电网计算中的收敛性问题。经过进行大量的算例分析, 证明该法简单易行, 可靠有效, 对于解决实际工程中出现的含小阻抗支路潮流计算的收敛问题具有很好的借鉴性。

(下转第 31 页 continued on page 31)

平稳性和定阶方法的采用可以显著提高电价预测的精确度。本文提供的改进 ARIMA 模型电价预测方法具有一般性,为各发电商的竞价提供了参考依据。

### 参考文献

- [1] 周明, 严正, 倪以信, 等. 含误差预测校正的 ARIMA 电价预测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 63-68.  
ZHOU Ming, YAN Zheng, NI Yi-xin, et al. A Novel ARIMA Approach on Electricity Price Forecasting with the Improvement of Predicted Error[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):63-68.
- [2] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 基于小波分析的短期电价 ARIMA 预测方法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 50-55.  
ZHOU Ming, NIE Yan-li, LI Geng-yin, et al. Wavelet Analysis Based ARIMA Hourly Electricity Prices Forecasting Approach[J]. Power System Technology, 2005, 29(9):50-55.
- [3] Liu J Y, Li L, Wang H F. Congestion Management of N-1 Contingency with the Participation of Load Bidding[A]. in: UPEC[C]. UK: 2002.
- [4] Marannino P, Vaiati R, Zanellini, et al. OPF Tools for Optimal Pricing and Congestion Management in a Two Sided Auction Market Structure[A]. in: 2001 IEEE Porto Power Tech Conference[C].2001.1-7.
- [5] 胡峰, 彭力. 基于时间序列模型的电价预测方法[J]. 继电器, 2008,36(2):41-46.  
HU Feng, PENG Li. Electricity Price Forecasting Solution Based on Time Series Models[J]. Relay, 2008,36(2):41-46.
- [6] 秦磊, 邹斌. 基于小波神经网络的电价滚动预测模型[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2008,(2):48-52.  
QIN Lei, ZOU Bin. Electricity Price Forecasting Model Based on Wavelet-neural Network[J]. Journal of Jiangnan University(Natural Science Edition), 2008,(2):48-52.
- [7] 胡峰, 彭力. 基于分时段多模型的短期电价预测[J]. 华东电力, 2008,(6):24-28.  
HU Feng, PENG Li. Short-term Price Forecast Models Based on Period-decoupled Price Sequence[J]. East China Electric Power, 2008,(6):24-28.

收稿日期: 2008-10-11; 修回日期: 2008-12-27

### 作者简介:

曾 鸣 (1957-), 男, 教授, 主要从事电力市场领域的研究与教学工作; E-mail:wqlwxl@hotmail.com

刘 玮 (1966-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场理论与实务。

(上接第 19 页 continued from page 19)

### 参考文献

- [1] Tylavsky D J, Crouch P E, Jarriel L F. The Effects of Precision and Small Impedance Branches on Power Flow Robustness [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 6-14.
- [2] 西安交通大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [3] 姚玉斌, 鲁宝春, 陈学允. 小阻抗支路对牛顿法潮流的影响及其处理方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 27-31.  
YAO Yu-bin, LU Bao-chun, CHEN Xue-yun. A Method to Deal with the Effect of Small Impedance Branches to Prevent Divergence in Newton Raphson Load Flow[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 27-31.
- [4] 姚玉斌, 蔡兴国, 陈学允, 等. PQ 分解法潮流求解含有小阻抗支路系统的收敛性分析[J]. 继电器, 2000, 28(4): 6-12.  
YAO Yu-bin, CAI Xing-guo, CHEN Xue-yun, et al. Analysis of Convergence of PQ Load-flow for System with Small Impedance Branches [J]. Relay, 2000, 28(4): 6-12.
- [5] 许可, 郎兵. 快速解耦法潮流计算针对小阻抗支路处理方法的研究[J]. 北京交通大学学报, 2005, 25(9): 107-110  
XU Ke, LANG Bing. Method to Deal with Small Impedance Branches Based on Fast Decoupled Load Flow Algorithm[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 25(9): 107-110.
- [6] 于继来, 王江, 柳焯. 电力系统潮流算法的几点改进[J]. 电机工程学报, 2001, 21(9): 88-93.  
YU Ji-lai, WANG Jiang, LIU Zhuo. Improvements on Usual Load Flow Algorithms of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 88-93.
- [7] 姚玉斌, 刘东梅, 陈学允. 求解含有小阻抗支路系统潮流的一种新方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(4): 525-529.  
YAO Yu-bin, LIU Dong-mei, CHEN Xue-yun. New Load-flow Method to Deal with System with Small Impedance Branches [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(4): 525-529.
- [8] 诸骏伟. 电力系统分析(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.  
ZHU Jun-wei. Power System Analysis, Part One[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [9] 电力系统分析综合程序 6.0 版 EPRI-36 算例说明[Z]. 中国电力科学院。

收稿日期: 2008-10-08; 修回日期: 2008-11-24

### 作者简介:

韩 平 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: integrity\_99@163.com

刘文颖 (1955-), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制及电力系统智能调度;

吴 琼 (1979-), 男, 研究方向为电力系统分析与控制及电力规划。