

基于电流电压补偿原理的支路开断电压快速算法

刘光晔, 成珊, 汪洋

湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082

摘要 提出了一种基于电流电压补偿原理的支路开断电压快速算法。该算法通过牛顿潮流法计算出故障前网络节点电压, 利用已收敛的潮流修正方程对线路开断参数 2 阶求导, 求出开断电压电流的二阶泰勒级数。基于支路 (不包括发电机) 退出运行, 节点的电流电压满足节点注入功率不变的约束条件, 计算出电流电压修正量互为补偿的平均值。利用该平均值作为电压泰勒展开新的修正量, 得出线路开断时各节点的电压。该方法的优点是线路开断时不必对系统导纳矩阵因子表进行修正, 且只需低阶泰勒展开就可得到精确的节点电压值, 同时能够很好地满足计算速度与精度的要求。IEEE 标准算例计算结果验证了所提出方法的有效性。

关键词 支路开断电压; 线路开断参数; 泰勒级数; 电流电压补偿; 注入功率

中图分类号 TM614

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.15.007

An Algorithm of Rapidly Determining Grid-fault Voltage Based on the Principle of Compensation in Current and Voltage

LIU Guangye, CHENG Shan, WANG Yang

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract This paper proposes an algorithm of rapidly determining the node voltage based on current and voltage compensation. The pre-contingency voltage is calculated by Newton power flow method, and the derivatives of first 2 orders of current and voltage with respect to branch outage parameters are calculated by using the convergent power flow equation of the base network topology. The values of current and voltage are obtained by using the Taylor series expansion. Lines out of operation (excluding the generator) based on the power injection remain unchanged, the node's current and voltage satisfy the compensation principle, the function of the node voltage with respect to the fault branch parameters is obtained by calculating the average compensation of current and voltage as the voltage Taylor expansion of the correction. The advantage of this method lies in the fact that the admittance matrix is not to be re-factorized after one branch is out of operation, and the accurate node voltage can be obtained by using only a low order Taylor expansion, to meet the requirements of calculation speed and accuracy. The feasibility and the efficiency of the proposed method are tested on the standard IEEE system.

Keywords branch-outage voltage; branch outage parameter; Taylor series; current and voltage compensation; power injection

0 引言

随着电力系统的不断发展, 尤其是近期国内电力市场改革的日益迫近, 系统的安全运行受到越来越多的关注。运行人员需要一种高效的安全分析工具辅助分析系统运行方式和安全水平。文献[1]、[2]采用了基于补偿法的快速解耦一次迭代方法, 但需重新形成因子表, 计算时间较长。文献[3]所提方法对泰勒级数阶次有较高的要求, 增大了程序的计算量。

文献[4]、[5]可快速估算出灵敏度, 计算开断节点的电压, 但在线路开断参数的各高阶导数计算过程中, 因其灵敏度三阶至多阶导数值计算采用了省略式, 不计算节点电压多阶导数值, 计算结果精确度不高, 实用价值受限。

本文提出了一种兼顾速度与精度的计算线路开断电压的方法 (本文所指线路开断不包括发电机退出运行)。该方法根据泰勒级数的 $N-1$ 网络下各节点电压对线路运行参数灵

收稿日期: 2011-03-03; 修回日期: 2011-04-22

作者简介: 刘光晔, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制, 电子信箱: liuguangye@21cn.com

敏度的快速修正算法, 求出开断电流电压的二阶泰勒级数。针对支路退出运行, 节点注入功率不变的约束条件求出节点电流电压修正量互为补偿的平均值, 对电压泰勒展开做进一步较为精确的修正, 得出各节点的开断电压。

1 节点电流电压补偿原理

电力系统网络中, 不考虑发电机退出的支路退出运行节点的注入功率不变, 即节点电压电流的变化满足功率恒定的关系式

$$S_{i0} - (V_{i0} + \Delta V_i)(\hat{I}_{i0} + \Delta \hat{I}_i) = 0 \quad (1)$$

式中, S_{i0} 、 V_{i0} 、 $\hat{I}_{i0}$ 分别为节点的初始注入功率及初始电压、电流, $\hat{I}_{i0}$ 为电流的共轭, ΔV_i 为电压的微变量。由式(1)可知, 节点的电压电流将朝相反的方向变化以满足功率恒定的条件, 此处称之为电流电压相互补偿原理。

由式(1)可以得到电流电压修正量可以互为补偿的条件, 即

$$\Delta V_i = -V_{i0} \Delta \hat{I}_i / (\hat{I}_{i0} + \Delta \hat{I}_i) \quad \Delta \hat{I}_i = -\hat{I}_{i0} \Delta V_i / (V_{i0} + \Delta V_i) \quad (2)$$

根据式(2), 取电流电压修正量互为补偿的平均值:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta V} &= (-V_{i0} \Delta \hat{I}_i / (\hat{I}_{i0} + \Delta \hat{I}_i) + \Delta V_i) / 2 \\ \overline{\Delta \hat{I}_i} &= (-\hat{I}_{i0} \Delta V_i / (V_{i0} + \Delta V_i) + \Delta \hat{I}_i) / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

可以证得式(3)所得结果也必定满足注入节点功率恒定不变的边界条件, 即

$$V_{i0} \hat{I}_{i0} = (V_{i0} + \overline{\Delta V})(\hat{I}_{i0} + \overline{\Delta \hat{I}_i}) \quad (4)$$

根据上面的推理过程, 将 $\overline{\Delta V}$ 作为节点电压泰勒展开新的修正量, 即可得到开断状态下各节点 i 的电压为

$$V_i = V_{i0} + \overline{\Delta V} \quad (5)$$

2 开断支路潮流计算的状态转移

用高阶泰勒级数展开式估计线路开断以后节点电压的大小, 在求得基态网络节点电压与雅可比矩阵后, 利用潮流方程的功率平衡式得到节点电压与开断线路参数的高阶导数, 由泰勒级数展开式估计线路开断引起的节点电压节点电流的变化量。

2.1 节点电压泰勒展开

设节点 $k-l$ 之间断开支路的 Π 型等值电路参数(导纳矩阵元素)为 ΔY_{k0} , ΔY_{l0} , ΔY_{kl} , 设 λ 为开断支路参数连续变化的参变量, Y_0 为系统断开支路前的初始导纳矩阵。 $\lambda=1$ 时为初始状态; $\lambda=0$ 时为断开状态。线路潮流示意图如图 1 所示。

没有线路开断的基态网络潮流方程为

$$-J \Delta V = \Delta W \quad (6)$$

其中, J 为断开前初始状态注入功率 S_{i0} 对应的雅可比矩阵, ΔW 为有功、无功以及电压幅值偏差量, ΔV 为电压修正量。式(6)两边同时对 λ 求导数可得

$$\frac{d \Delta V}{d \lambda} = -J^{-1} \frac{d \Delta W}{d \lambda} \quad (7)$$

由于潮流收敛, 有 $\frac{d \Delta V_i}{d \lambda} = \frac{d V_i}{d \lambda}$, $\frac{d^k \Delta V_i}{d \lambda^k} = \frac{d^k V_i}{d \lambda^k}$ [8], 由式(7)

两边再对 λ 求导数, 则

$$\frac{d^2 V}{d \lambda^2} = -J^{-1} \left[\frac{d J}{d \lambda} \frac{d V}{d \lambda} + \frac{d^2 \Delta W}{d \lambda^2} \right] \quad (8)$$

式(7)、式(8)左边分别为待求电压对开断参数的一阶、二阶导数, $\frac{d \Delta W}{d \lambda}$ 、 $\frac{d^2 \Delta W}{d \lambda^2}$ 分别为 ΔW 对开断参数的一阶、二阶导数 [9],

$\frac{d J}{d \lambda}$ 为 J 对开断参数的一阶导数 [9]。

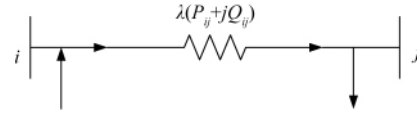


图 1 线路潮流示意

Fig. 1 Branch power flow diagramm

2.2 节点电流泰勒展开

节点 i 的注入电流为

$$I_i = \frac{\hat{S}_i}{\hat{V}_i} \quad (9)$$

因本文考虑断开支路不包含发电机退出, 固注入功率 S_i 为常数, 式(9)两边对 λ 求一阶及二阶导数, 有

$$\frac{d I_i}{d \lambda} = -\frac{\hat{S}_i}{\hat{V}_i^2} \frac{d \hat{V}_i}{d \lambda} \quad \frac{d^2 I_i}{d \lambda^2} = \hat{S}_i \left[2 \left(\frac{d \hat{V}_i}{d \lambda} \right)^2 - \hat{V}_i \frac{d^2 \hat{V}_i}{d \lambda^2} \right] / \hat{V}_i^3 \quad (10)$$

沿着开断支路参数连续变化约束轨迹方向, 可以将电压与电流关于 λ 的函数关系展开为泰勒级数 [9], 可得到线路开断以后节点电压、电流为

$$\begin{aligned} V_{N-1} &= V + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \frac{d^k V}{d \lambda^k} (-1)^k = V + \Delta V \\ I_{N-1} &= I + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \frac{d^k I}{d \lambda^k} (-1)^k = I + \Delta I \end{aligned} \quad (11)$$

3 算例仿真与分析

为验证本文所提算法的正确性, 以 IEEE 14 和 IEEE 30 节点系统为算例进行分析。

对 IEEE 14 节点系统断开支路 4-5, 仿真计算结果见表 1 和表 2。从表 1 的数据可以看出, 节点电流电压的变化确实满足电流电压相互补偿的原理, 且与实际功率的误差非常小, 基本满足注入功率不变的约束条件。进一步验证了本文电流电压补偿原理理论的正确性。从电压误差可以看出如果仅仅依靠增大泰勒阶数不仅计算量大而且准确性也差。

从表 2 所得结果看, 利用本文方法修正后的电压误差比泰勒展开所得到的节点误差要小, 对泰勒一阶做修正后平均

表 1 IEEE 14 断开支路 4-5 后节点泰勒展开电压电流与
牛顿法节点电压电流的误差比较 (pu)

Table 1 Current and voltage comparison between accurate
and predicted values by Taylor's series for the branch of
4-5 outage in IEEE 14 bus test system (pu)

节点 号	泰勒一阶		泰勒二阶		二阶节点注入 功率误差/ 10^{-4}
	I	V	I	V	
1	0.0260	0	0.0260	0	0
2	0.0642	-0.0012	0.0643	-0.0012	0.0116+0.0188i
3	0.0017	-0.0000	0.0018	-0.0000	-0.7057+0.0329i
4	0.0014	-0.0032	0.0010	-0.0026	-0.8958+0.2496i
5	0.0001	-0.0005	0.0001	-0.0003	-0.0412-0.0119i
6	-0.0042	0.0000	-0.0042	0.0000	-0.0003+0.0001i
7	0.0000	-0.0036	0.0000	-0.0031	0.0000+0.0000i
8	0.0263	-0.0001	0.0262	-0.0001	0.0000+0.1824i
9	0.0021	-0.0067	0.0018	-0.0060	-0.2462-0.0290i
10	0.0006	-0.0061	0.0005	-0.0055	-0.0517-0.0071i
11	0.0001	-0.0039	0.0001	-0.0034	-0.0043+0.0003i
12	0.0000	-0.0003	0.0000	-0.0002	0
13	0.0002	-0.0015	0.0002	-0.0014	-0.0007+0.0005i
14	0.0007	-0.0049	0.0006	-0.0043	-0.0425+0.0057i
电压幅值 误差平均值	-0.0023		-0.0020		

表 2 IEEE 14 断开支路 4-5 后修正电压与牛顿法比较的电压
误差及修正后节点的注入功率误差 (pu)

Table 2 Voltage comparison between accurate value and
that corrected by Taylor's series and the later
Power injection deviation for the branch of 4-5
outage in IEEE 14 bus test system (pu)

节点 号	修正后电压误差				修正后注入功 率误差/ 10^{-2}
	一阶 幅值	相角	二阶 幅值	相角	
1	0	0	0	0	0
2	-0.0009	-0.0120	-0.0003	-0.0122	0.0002-0.0005i
3	-0.0000	-0.0322	-0.0000	-0.0311	-0.0001+0.0003i
4	-0.0006	-0.0698	-0.0000	-0.0694	-0.0010+0.0030i
5	-0.0003	0.0287	-0.0001	0.0286	0.0003-0.0008i
6	-0.0000	0.0032	-0.0000	0.0033	-0.0000-0.0000i
7	-0.0012	-0.0510	0.0004	-0.0506	0
8	0.0001	-0.0412	0.0003	-0.0509	0.0004+0.0006i
9	-0.0046	-0.0413	-0.0007	-0.0409	-0.0002+0.0006i
10	-0.0044	-0.0333	-0.0006	-0.0319	-0.0007+0.0006i
11	-0.0031	-0.0148	-0.0003	-0.0136	-0.0001+0.0001i
12	-0.0003	0.0008	-0.0000	0.0009	0.0000+0.0000i
13	-0.0014	-0.0022	-0.0001	-0.0012	-0.0001+0.0000i
14	-0.0036	-0.0243	-0.0008	-0.0220	-0.0000+0.0000i
电压幅 值误差 平均值	-0.0015		-0.0002		

电压幅值误差只有 0.0015, 对电压泰勒二阶做修正后平均电压幅值误差只有 0.0002, 最大电压误差也只达到 0.0008。相对于泰勒展开, 精度得到很大的提高, 且该方法只需将泰勒展开在 2 阶就有很高的准确性, 减小了计算的工作量。

对 IEEE 30 节点系统断开支路 16-17, 仿真结果见表 3。从表 3 的数据可以看出, 修正后的电压精确度高于直接泰勒展开求出的电压结果, 只需要展开至二阶就有很高的精确度, 验证了本文方法的正确性。

表 3 IEEE 30 节点系统断开支路 16-17 后计算结果 (pu)

Table 3 Result of calculation for the line 16-17 outage
on IEEE 30 bus system (pu)

节点	泰勒二阶		修正二阶	
	电压幅值	相角	电压幅值	相角
1	0	0	0	0
2	0	-0.0001	0	-0.0001
3	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
5	0	-0.0001	0	-0.0002
6	-0.0002	-0.0002	0	-0.0004
7	-0.0001	-0.0002	0	-0.0003
8	0	-0.0003	0	-0.0005
9	-0.0009	-0.0015	-0.0001	-0.0023
10	-0.0017	-0.0023	-0.0004	-0.0033
11	0	-0.0015	0	-0.0024
12	0.0010	0.0027	0.0003	0.0040
13	0	0.0027	0	0.0041
14	0.0007	0.0021	0.0001	0.0031
15	0.0003	0.0016	0	0.0024
16	0.0049	0.0061	0.0011	0.0088
17	-0.0031	-0.0039	-0.0006	-0.0055
18	-0.0004	0.0002	-0.0004	0.0004
19	-0.0009	-0.0006	-0.0004	-0.0008
20	-0.0010	-0.0011	-0.0003	-0.0015
21	-0.0015	-0.0020	-0.0003	-0.0029
22	-0.0015	-0.0019	-0.0002	-0.0028
23	-0.0002	0.0005	-0.0002	0.0008
24	-0.0008	-0.0010	-0.0007	-0.0013
25	-0.0005	-0.0007	-0.0004	-0.0011
26	-0.0005	-0.0007	-0.0004	-0.0010
27	-0.0003	-0.0007	-0.0003	-0.0009
28	-0.0001	-0.0003	-0.0001	-0.0005
29	-0.0004	-0.0007	-0.0003	-0.0010
30	-0.0003	-0.0007	-0.0002	-0.0009

两种方法所需计算时间对比如表 4 所示。从表中数据可以看出, 本文在泰勒法的基础上计算时间增加很少, 但是准确性有了很大的提高, 证实本文所提方法的有效性, 因其所需阶数不高, 相对提高了计算速度。

表 4 IEEE 系统支路断开时计算时间对比 (单位:s)
Table 4 Comparison of execution time on IEEE system
under branch-outage (unit: s)

系 统	泰勒法		修正法	
	一阶	二阶	一阶	二阶
IEEE 14	0.0490	0.0652	0.0589	0.0646
IEEE 30	0.0545	0.0749	0.0567	0.0674

4 结论

提出了利用电压电流边界补偿原理对电压的泰勒展开作较为精确的修正算法,克服了泰勒展开所得支路开断后节点电压精度不高的缺陷,具有明确的物理意义,且只需要低阶泰勒展开就可以得到精确的节点电压值。通过 IEEE 标准网络算例结果表明该方法的正确性。该方法无需反复迭代求解、重新形成雅克比矩阵、重新修改节点导纳矩阵,对于大型电网的 $N-1$ 电压估计在线监视和分析具有重大的意义。

参考文献 (References)

[1] 宋依群,刘充许,吴际舜.线路开断下牛顿潮流的补偿算法[J].电网技术,1998,22(11):27-29.
Song Yiqun, Liu Chongxu, Wu Jishun. *Power System Technology*, 1998, 22(11): 27-29.

[2] 孙鸣,单永梅.补偿法在继电保护整定计算中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27(7): 28-31.
Sun Ming, Shan Yongmei. *Power System Technology*, 2003, 27(7): 28-31.

[3] 吴政球,曾兴嘉,赵柯宇,等. $N-1$ 故障电压稳定极限高阶灵敏度快速计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 135-138.
Wu Zhengqiu, Zeng Xingjia, Zhao Keyu, *et al. Proceedings of the CSU-EPSA*, 2010, 22(2): 135-138.

[4] 容文光,吴政球,匡文凯,等.基于泰勒级数展开的 $N-1$ 牛顿拉夫逊法快速潮流修正计算[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 42-46.
Rong Wenguang, Wu Zhengqiu, Kuang Wenkai, *et al. Power System Technology*, 2007, 31(2): 42-46.

[5] 邓阳,吴政球,容文光,等.基于泰勒级数的 $N-1$ 网络快速灵敏度修正计算[J]. 继电器, 2007, 35(16): 23-26.
DengYang, Wu Zhengqiu, Rong Wenguang, *et al. Relay*, 2007, 35(16): 23-26.

[6] 江伟,王成山,张沛,等.考虑支路故障情况下的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 21-24.
Jiang Wei, Wang Chengshan, Zhang Pei, *et al. Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(13): 20-25.

[7] 傅旭,王锡凡.考虑 $N-1$ 静态安全的电力系统最大负荷能力计算方法 [J]. 电网技术, 2006, 30(6): 6-9.
Fu Xu, Wang Xifan. *Power System Technology*, 2006, 30(6): 6-9.

[8] 钟浩,吴政球,刘青,等.基于曲线拟合的泰勒级数电网故障后电压快速准确计算[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(8): 40-44.
Zhong Hao, Wu Zhengqiu, Liu Qing, *et al. Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2010, 37(8): 40-44

[9] Gregor V, Ferdinand G. A new concept of voltage-collapse protection based on local phasors[J]. *IEEE Transaction Sonpower Delivery*, 2004, 1(2): 576-581.

[10] Ejebe G C, Waight J G, Sanots-Nieto M, *et al.* Fast calculation of linear available transfer capability [J]. *IEEE Trans Power Syst*, 2000, 15(3): 1112-1116.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·



“第五届生物产业技术研讨会”征文

由中国生物工程学会主办的“第五届生物产业技术研讨会”将于 2011 年 8 月 16—18 日在昆明召开。会议旨在推动在生物产业技术中应用广泛的前沿技术的进步与发展。

征文范围:蛋白质及其他生物大分子分离纯化(包括核酸、多糖等);天然活性产物分离与纯化;色谱分离技术的研究及应用;新型的生物医药分离纯化技术;生物医药分离介质与分离设备的研究;工业生物技术。

通信地址:北京市东城区青年湖南街 13 号 A 座三层(100011)李江胜。

联系电话:010-59798053;电子信箱:swcy@swcy.org。

会议网站:www.swcy.org。