

PQ 分解法潮流求解含有小阻抗支路系统的收敛性分析

姚玉斌¹, 蔡兴国¹, 陈学允¹, 盖志武²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 从潮流计算的基本方程出发, 通过对迭代过程中小阻抗支路两端电压的幅值和相角的变化规律的分析, 得出了 PQ 分解法潮流计算含有小阻抗支路的系统能够很好收敛的原因。从理论上为求解这类问题找到了快速、可靠的算法。

关键词: PQ 分解法; 收敛性; 小阻抗支路

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)04-0006-03

1 引言

牛顿法潮流由于具有可靠的收敛性、较快的计算速度及适中的内存需求, 得到了广泛地应用。但是, 对于某些病态系统来说, 仍可能出现不收敛的情况, 如在计算含有小阻抗支路的潮流问题时, 如果采用 0、1 方法起动, 牛顿法往往不能收敛^[1]。文献^[2]认为含有小阻抗支路系统潮流计算不收敛的原因是由于雅可比矩阵的数值条件变差引起的。文献^[1]从潮流计算的基本方程出发, 分析了小阻抗支路影响牛顿法潮流收敛性的原因, 并在此基础上结合电力系统网络的特点, 提出了一种选取牛顿法潮流电压初值的新方法——小阻抗支路零功率法, 提高了牛顿法潮流的收敛性。

PQ 分解法潮流(包括快速分解法潮流)是对牛顿法潮流的改进和简化而来的, 由于它的修正方程的系数矩阵的维数较低且为常数, 因而, 计算速度更快, 占用的内存更少。但由于它是从牛顿法潮流简化而来的, 所以, 当系统参量不符合简化条件时, 会影响其收敛性, 甚至会出现不收敛的情况^[3,4]。本文计算表明, PQ 分解法潮流对含有小阻抗支路的系统有很好的收敛性, 在这一方面要比牛顿法潮流优越。本文从潮流计算的基本方程出发, 对 PQ 分解法潮流计算含有小阻抗支路的系统能够很好收敛的原因进行了分析。

2 小阻抗变压器支路对潮流计算有关参数的影响。

小阻抗支路包括小阻抗变压器支路和小阻抗线

路。下面以小阻抗变压器支路为例分析一下采用常规的 0、1 起动时, 小阻抗支路对 PQ 分解法潮流计算有关参数的影响, 对小阻抗线路也能得到同样的结论。

图 1 为系统中的一条小阻抗变压器支路, 其参数如图。下面分析一下支路 ij 对潮流计算的影响。

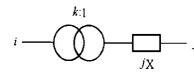


图 1 小阻抗变压器支路

2.1 节点 i 和节点 j 的导纳

节点 i 与节点 j 的导纳为:

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} = G_{i0} + j(B_{i0} - \frac{1}{k^2 x})$$

$$Y_{jj} = G_{jj} + jB_{jj} = G_{j0} + j(B_{j0} - \frac{1}{x})$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = j \frac{1}{kx}$$

其中 G_{i0} 、 B_{i0} 、 G_{j0} 、 B_{j0} 为节点 i 、 j 除支路 ij 以外所有支路所形成的电导与电纳。

2.2 与节点 i 及节点 j 有关的节点功率和 PQ 分解法潮流计算系数矩阵元素

当满足条件 $ij=0$ (1)

则有, $P_i = P_{i0}$, $P_j = P_{j0}$

其中 P_{i0} 、 P_{j0} 为节点 i 、 j 除支路 ij 以外所有支路所注入的有功功率。

$$Q_i = \frac{1}{k^2 x} V_i^2 - \frac{1}{kx} V_i V_j + Q_{i0} \quad (2)$$

$$Q_j = \frac{1}{x} V_j^2 - \frac{1}{kx} V_i V_j + Q_{j0} \quad (3)$$

其中 Q_{i0} 、 Q_{j0} 为节点 i 、 j 除支路 ij 以外所有支路所注入的无功功率。

与节点 i 及节点 j 有关的 PQ 分解法潮流计算系数矩阵元素如下:

收稿日期: 1999-10-08

作者简介: 姚玉斌(1965-)男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制, 计算机在电力系统中的应用。

$$B_{ii} = B_{i0} - \frac{1}{x}, \quad B_{jj} = B_{j0} - \frac{1}{x}, \quad B_{ij} = \frac{1}{x}$$

$$B_{ii} = B_{i0} - \frac{1}{k^2 x}, \quad B_{jj} = B_{j0} - \frac{1}{x}, \quad B_{ij} = \frac{1}{kx}$$

式中, B_{ii} 、 B_{jj} 、 B_{ij} 为 PQ 分解法系数矩阵 B 的元素; B_{i0} 、 B_{j0} 为 PQ 分解法系数矩阵 B 中不含支路 ij 时的元素; B_{ii} 、 B_{jj} 、 B_{ij} 为 PQ 分解法系数矩阵 B 的元素; B_{i0} 、 B_{j0} 为 PQ 分解法系数矩阵 B 中不含支路 ij 时的元素。

3 PQ 分解法求解含有小阻抗变压器支路系统的迭代过程分析

3.1 迭代过程中 $V_i^{(k)} = V_j^{(k)}$ 关系的推导

与节点 i 及节点 j 有关的节点功率得到上述值的前提是满足方程(1), 下面证明一下在迭代过程中 $V_i^{(k)}$ 、 $V_j^{(k)}$ 能够满足方程(1)这一条件, 即存在 $V_i^{(k)} = V_j^{(k)}$ 的关系, 式中 k 表示第 k 次迭代。

下面就节点 i 与 j 都不是平衡节点和节点 i 与 j 中某个节点是平衡节点两种情况讨论。

(1) 节点 i 与 j 都不是平衡节点

与节点 i 及 j 有关的有功功率不平衡量方程为:

$$(B_{i0} - \frac{1}{x}) V_{0i} + \frac{1}{x} V_{0j} +$$

$$B_{ik} V_{0k} = (P_{is} - P_{i0}) / V_i \quad (4)$$

$$B_{jk} V_{0k} = (P_{js} - P_{j0}) / V_j \quad (5)$$

式中, V_0 为系统平均电压、 $k \in j$ 表示节点 k 与节点 j 直接相连, $k \in V$ 表示节点 k 不属于平衡节点。

方程(4)中, 与 $1/x$ 相比, 其余项较小, 可略去, 因而由方程(4)可得,

$$-\frac{1}{x} V_{0i} + \frac{1}{x} V_{0j} = 0 \quad (6)$$

由方程(6)可得, $V_i = V_j$, 由于 $V_i^{(0)} = V_j^{(0)} = 0.0$, 则有, $V_i^{(1)} = V_j^{(1)}$, 同理可得出 $V_i^{(k)} = V_j^{(k)}$ 。

(2) 节点 i 与 j 中的一个节点是平衡节点

设节点 i 为 PQ (或 PV) 节点, 节点 j 为平衡节点。则仅存在与节点 i 有关的有功功率不平衡量方程为:

$$(B_{i0} - \frac{1}{x}) V_{0i} +$$

$$B_{ik} V_{0k} = (P_{is} - P_{i0}) / V_i \quad (7)$$

$$B_{ik} V_{0k} = (P_{is} - P_{i0}) / V_i$$

考虑方程(7)中, 与 $1/x$ 相比, 其余项较小, 可略去, 因而得出 $V_i = 0$, 由于 $V_i^{(0)} = V_j^{(0)} = 0.0$, 则有, $V_i^{(1)} = V_j^{(1)}$, 同理可得出 $V_i^{(k)} = V_j^{(k)}$ 。

因而得到, 无论节点 i 及节点 j 节点类型如何, 在迭代过程中 $V_i^{(k)}$ 、 $V_j^{(k)}$ 始终满足方程(1)这一条件, 即存在 $V_i^{(k)} = V_j^{(k)}$ 的关系

3.2 迭代过程中 V_i 和 V_j 的变化情况

下面分别针对节点 i 与 j 中的一个节点是 PQ 节点, 节点 i 与 j 都是 PQ 节点两种情况讨论迭代过程中 V_i 和 V_j 的变化情况。

(1) 节点 i 与 j 中的一个节点是 PQ 节点

设节点 i 为 PQ 节点, 节点 j 为 PV (或平衡) 节点。与节点 i 及 j 有关的无功功率不平衡量方程为:

$$(B_{i0} - \frac{1}{k^2 x}) V_i + B_{ik} V_k =$$

$$(-\frac{1}{k^2 x} V_i^2 + \frac{1}{kx} V_i V_j + Q_{is} - Q_{i0}) / V_i \quad (8)$$

与 $1/kx$ 、 $1/k^2 x$ 相比, 其余项较小, 可略去, 得到方程(9)

$$-\frac{1}{k^2 x} V_i = -\frac{1}{k^2 x} V_i + \frac{1}{kx} V_i \quad (9)$$

由方程(9)得

$$V_i = V_i - kV_j \quad (10)$$

$$\text{即 } V_i - V_i = kV_j \quad (11)$$

在迭代过程中, 变压器两端电压满足 $V_i^{(k)} = kV_j^{(k)}$, 计算可以收敛。

(2) 节点 i 与 j 都是 PQ 节点

与节点 i 及 j 有关的无功功率不平衡量方程为:

$$(B_{i0} - \frac{1}{k^2 x}) V_i + \frac{1}{kx} V_j + B_{ik} V_k =$$

$$(-\frac{1}{k^2 x} V_i^2 + \frac{1}{kx} V_i V_j + Q_{is} - Q_{i0}) / V_i \quad (12)$$

$$(B_{j0} - \frac{1}{x}) V_j + \frac{1}{kx} V_i + B_{jk} V_k =$$

$$(-\frac{1}{x} V_j^2 + \frac{1}{kx} V_i V_j + Q_{js} - Q_{j0}) / V_j \quad (13)$$

方程(12)乘以 k 和方程(13)相加得:

$$k B_{i0} V_i + B_{j0} V_j + k B_{ik} V_k + B_{jk} V_k = k(Q_{is} - Q_{i0})/V_i + (Q_{js} - Q_{j0})/V_j \quad (14)$$

在方程(12)中,与 $1/kx$ 相比,其余项较小,可略去,得到下式:

$$V_i = k V_j + V_i - k V_j \quad (15)$$

$$\text{即 } V_i - V_i = k(V_j - V_j) \quad (16)$$

可以看到,原来的方程(12)和(13)转化为等价的新方程(14)和(16),小阻抗支路的影响已不存在,因而潮流计算能够收敛。同时,从方程(16)可见,在迭代过程中,小阻抗支路两端的电压值满足 $V_i^{(k)} = kV_j^{(k)}$,该支路上不会出现无功功率流动,不会对潮流计算产生影响。

4 算例

本文分别对一个6节点系统和东北电网445节点实际系统采用常规的0、1启动分别用快速分解法和PQ分解法潮流进行了计算,均能收敛。

图2所示的6节点系统,为两个电源通过一个三绕组变压器向两个负荷供电,三绕组变压器中压绕组的等值电抗为小阻抗支路($x = 0.000001$),线路参数和节点数据分别见图2,图中数据及文中数据未标明单位者皆为标么值。

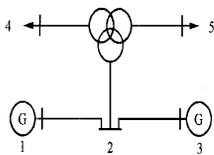


图2a 6节点系统图

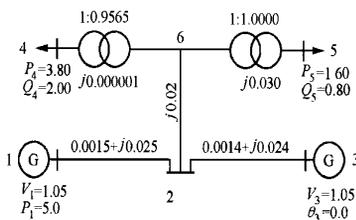


图2b 6节点系统等值电路图

东北电网445节点实际系统含有大量的小阻抗支路,其中, $x = 0.01$ 的支路有118条, $x = 0.001$ 的支路有49条, $x = 0.0001$ 的支路有41条, $x = 0.00001$ 的支路有22条,其中两条阻抗最小支路分

别为 $x = 0.000001$ 和 $x = 0.0000001$ 。

当6节点系统的小阻抗支路的阻值变化时,采用常规的0、1启动分别用极坐标形式牛顿法和快速分解法对其进行计算,收敛条件 $= 0.00001$ 。下面对计算结果进行分析。

4.1 快速分解法的计算结果

6节点系统潮流计算的初始最大功率不平衡量为 $Q_{\max} = Q_6 = -47546.91$,迭代7次收敛,小支路两侧节点的电压幅值和电压相角的迭代结果见表1,每次迭代时节点4与节点6的电压相角几乎相等,每次迭代时节点4与节点6的电压幅值都满足 $V_i^{(k)} = kV_j^{(k)}$,即 $V_6^{(k)} = kV_4^{(k)}$ 。

对东北电网445节点实际系统潮流计算的初始最大功率不平衡量为 $Q_{\max} = Q_{118} = -475465.81$,迭代11次收敛。

4.2 快速分解法和牛顿法对小阻抗支路阻值大小的敏感程度比较

表1 6节点系统迭代结果

| 迭代次数 | V_4 | V_6 | δ_4 | δ_6 |
|------|---------|---------|------------|------------|
| 1 | 0.97619 | 0.93373 | -0.12041 | -0.12041 |
| 2 | 0.96947 | 0.92730 | -0.12362 | -0.12362 |
| 3 | 0.96828 | 0.92616 | -0.12435 | -0.12434 |
| 4 | 0.96806 | 0.92595 | -0.12452 | -0.12451 |
| 5 | 0.96802 | 0.92591 | -0.12455 | -0.12454 |
| 6 | 0.96801 | 0.92591 | -0.12455 | -0.12455 |
| 7 | 0.96801 | 0.92591 | -0.12455 | -0.12455 |

对6节点系统,当 X_{4-6} 取不同值时,分别采用快速分解法和牛顿法计算,当 $X_{4-6} < 1.5 \times 10^4$ 时,牛顿法已不收敛,而当 $X_{4-6} < 3.0 \times 10^{13}$ 时,快速分解法才不收敛。

5 结论

本文详细分析了PQ分解法潮流(包括快速分解法)在求解含有小阻抗变压器支路系统时,其收敛性优于牛顿法潮流的原因,从理论上证明PQ分解法潮流是求解这类问题的一种快速、可靠的算法。算例的计算结果表明分析的结果是正确的。

参考文献:

- [1] 姚玉斌,鲁宝春,陈学允.小阻抗支路对牛顿法潮流的影响和处理方法.电网技术,1999,23(9).
- [2] Tylavsky D J, Crouch P E, Jarriel L F, Singh J, Adapa R. The effects of precision and small impedance branches on power flow robustness. IEEE Trans on PWR, 1994, 9(1): 6 ~ 14.

(下转第12页)

定值 $z_d = 30^\circ$ 。

(3) 如果按式(9)计算得的 $z_d > 60^\circ$, 则选用整定值 $z_d = 60^\circ$ 。

以上述方法校验及选用 z_d 的目的是为了保证选用的 z_d 不但能满足式(2)、(5)、(6)的要求, 并能满足式(7)、(8)的要求, 而且又能达到正方向相间短路时方向继电器“或”门出口有尽可能高的灵敏度。

这种整定计算方法的优点是:

1) 按式(9)计算得 z_d , 如果该 z_d 又满足式(10)的要求, 则选用该值作为内角 α 的整定值。其优点是: 当保护安装处正方向任何地点三相短路或保护安装处正方向附近发生一切类型的两相短路时, 方向继电器的“或”门出口动作的灵敏度最高(即动作方程中的余弦值为“+1”); 而当保护安装处正方向其他任何地点发生一切类型的两相短路时, 方向继电器的“或”门出口也能可靠地动作(即动作方程中

的余弦值为正数, 但并非为“+1”)。

2) 如果按式(9)计算得的 $z_d < 30^\circ$, 不满足式(10)的要求, 则选用 $z_d = 30^\circ$; 或者按式(9)计算得的 $z_d > 60^\circ$, 也不满足式(10)的要求, 则选用 $z_d = 60^\circ$ 。这种整定结果与传统的模拟式方向保护只能在 30° 、 45° 二者中选择其一为整定值的方法相比, 前者在正方向相间短路时的动作灵敏度也必定高于后者。

本文所述的 z_d 整定计算方法从根本上抛弃了传统的只在 30° 、 45° 两值中任择其一为整定值的不合理的约束, 充分发挥了微机保护整定值可按动作方程的最佳考虑来设置的数字化优点。

参考文献:

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(第二版). 水利电力出版社, 1985, 11.

Study on interior angle setting calculation of microprocessor - based directional power relay

YAO Qing-lin¹, YAO Wu², ZHANG Xue - shen²

(1. Hefei Industrial University, Anhui 230009, China; 2. Xuchang Relay Research Institute, Henan 461000, China)

Abstract: There are only two set values ($30^\circ, 45^\circ$) for interior angle α of the stimulated directional power relay as the protection in phase to phase short circuit fault. An accurate setting formula for interior angle α of the microprocessor - based directional power relay as the protection in phase to phase short - circuit fault is proposed and analyzed, users can set z_d as a calculation value or at least an optimum in the formula. Therefore the operation sensitivity and reliability of the directional relay would be improved greatly. The opinion is new and practical.

Key words: microprocessor - based protection; directional power relay; interior angle; set calculation

(上接第 8 页)

- [3] 王祖佑. 电力系统稳态运行计算机分析. 水利电力出版社, 1987.

- [4] 西安交通大学等. 电力系统计算. 水利电力出版社, 1978.

Analysis of convergence of PQ load-flow for system with small impedance branches

YAO Yu-bin¹, CAI Xing-guo¹, CHEN Xue-yun¹, GAI Zhi-wu²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Northeast China Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Analysis of the variation of the voltage magnitude and phase angle at both ends of small impedance branches is presented. This analysis is based on element equations of PQ decoupled load flow which has a good convergence for a system with small impedance branches. The analysis also demonstrates that the PQ decoupled load flow method may be used to develop fast, superior and robust algorithms.

Key words: PQ decoupled load flow; convergence; small impedance branches