

# 配电网重构的均衡视在精确矩法

蔡中勤, 郭志忠, 陈学允

(哈尔滨工业大学 353 信箱, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 结合配电网的辐射型结构特点, 类比力学中力矩的概念, 给出了视在精确矩的定义。配电网重构问题实质是一负荷平衡问题。基于这种平衡思想和视在精确矩的概念, 提出了配电网重构的均衡视在精确矩法, 即开关的闭合或开断以是否使得开关两端的视在精确矩达到均衡为依据。该方法以开关两端的视在精确矩和的差值  $ET$  作为衡量负荷的平衡尺度, 以  $ET$  量的大小来判断开关的闭合或开断, 即选择具有最大  $ET$  值的开关予以闭合, 而选择开关闭合后形成的单环网内具有最小  $ET$  的支路予以开断, 从而达到平衡负荷并获得较大的重构效益的目的。文中提出的视在精确矩法较好地反映了平衡的思想, 并对此给出了详细的解释。文中提出的方法在实验算例上进行了验证, 并和其它方法作了比较, 算例结果表明了该方法简捷有效, 具有实用化的应用潜力。

**关键词:** 配电网; 视在精确矩; 重构

**中图分类号:** TM711

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2000)12-0008-05

## 1 引言

配电网重构就是通过对联络开关的操作来调整网络结构, 平衡负荷, 消除过载, 降低网损, 从而提高系统运行的经济性和供电电压质量。目前配电网重构的算法较多, 基本上可分两大类: 一类是以传统的优化技术为基础的各种优化算法。典型的算法有最优流模式法<sup>[1]</sup>和其改进算法<sup>[2]</sup>, 基于负荷转移的平衡算法<sup>[3]</sup>以及网损估计法<sup>[4]</sup>等。另一类是人工智能方法, 包括模拟退火法<sup>[5]</sup>, 人工神经网络法<sup>[6]</sup>, 遗传算法<sup>[7]</sup>等方法。传统的优化法和智能算法比较, 都有各自的优缺点。传统优化法速度快, 方法简单明确, 具有实用化的应用潜力, 但解易陷于局部最优解。智能算法虽然从理论上能避免这一缺点, 但因其计算时间过长而面临着实用化的考验。

本文结合配电网的辐射型结构特点, 类比力学中的力矩, 给出了视在精确矩的定义。基于负荷平衡思想和视在精确矩的定义, 本文提出了配电网重构的均衡视在精确矩法。该方法以开关两端的视在精确矩和的差值  $ET$  作为衡量系统负荷的平衡尺度, 以该量作为开关闭合或开断的依据, 即选择具有最大  $ET$  值的开关予以闭合, 而选择开关闭合后形成的单环网内具有最小  $ET$  的支路予以开断, 从而达到平衡负荷并获得较大的重构效益的目的。本文提出的视在精确矩法较好地反映了平衡的思想, 对此本文给出了详细的解释。该方法在实验算例上进行验证, 并和其它方法作了比较, 算例结果表明了

该方法简捷有效, 具有实用化的应用潜力。

## 2 配电网重构的均衡视在精确矩法

### 2.1 视在精确矩的定义

对于辐射型结构的配电网, 任一节点  $i$  所对应的视在精确矩定义如下:

$$T_s(i) = r_i \times \left[ \frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{V_i^2} - \sum_{s=i} \frac{P_{bs}^2 + Q_{bs}^2}{V_s^2} \right] \quad (1)$$

这里,  $r_i$  表示  $i$  节点到源节点的电气距离;  $P_{bi}$ ,  $P_{bs}$  和  $Q_{bi}$ ,  $Q_{bs}$  分别为流入节点  $i$  和节点  $s$  的有功功率和无功功率;  $s=i$  表明节点  $s$  是节点  $i$  的子节点;  $V_i$  和  $V_s$  分别为节点  $i$  和  $s$  的节点电压。

相应地, 在  $V_i \approx 1$  的近似条件下, 我们可以得到其视在近似矩, 其定义如下:

$$T_s(i) = r_i \times \left[ (P_{bi}^2 + Q_{bi}^2) - \sum_{s=i} (P_{bs}^2 + Q_{bs}^2) \right] \quad (2)$$

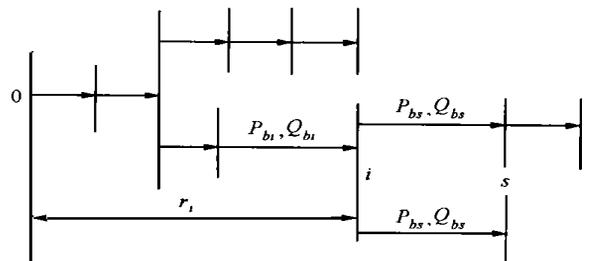


图1 视在精确矩定义的示意图

从图1可以看出, 当把源节点0看成平衡支点时(实际上在配电网中源节点或变电站节点相当于

一平衡节点),如前所述,  $r_i$  表示  $i$  节点到源节点的电气距离,其值为从  $i$  节点起逆着功率流向,直到源节点,所遇到的支路电阻之和。类比力学中力矩的概念,即  $r_i$  相当于力矩定义中的“力臂”项,如图 1 所示。 $\frac{P_{bi} + Q_{bi}^2}{V_i^2}$  反映了  $i$  节点及其从属节点的负荷功率对网损的影响,  $\frac{P_{bs} + Q_{bs}^2}{V_s^2}$  则反映了  $i$  节点的子节点及其从属节点的负荷功率对网损的影响,因而  $\left[ \frac{P_{bi}^2 + Q_{bi}^2}{V_i^2} - \frac{P_{bs} + Q_{bs}^2}{V_s^2} \right]$  仅反映了节点  $i$  的负荷功率对整个网损的影响,也即该项相当于作用在节点  $i$  的“力”,又该项包括有功和无功功率,并且考虑了电压的影响,因此我们称  $T_s(i)$  为“视在精确矩”。

由式(1)可推导出  $\sum_{i=1}^n T_s(i)$  则为整个系统的网损之和。

### 2.2 均衡矩法的思想

配电网重构的算法就是确定开关的开合状态,达到降损,改善电压质量的目的。决定开关的合和断是配电网重构的两大关键步骤。重构问题实则为一负荷平衡问题,那么用什么量来刻画负荷平衡的尺度合适呢?本文基于力学中力矩平衡的思想,从视在精确矩的定义出发,提出了重构的均衡视在精确矩法,即开关的闭合或开断以使开关两端的视在精确矩达到均衡为目的。下面我们来详细阐述并分析均衡矩法的思想。

对任一待闭合的开关,分别从该开关两端的左节点和右节点起,逆着功率的流向,向源节点前进,分别计算逆流而上所遇到的各节点的视在精确矩并累加求和,可得到如下的表达式:

$$ST_{left} = \sum_{i \geq left} T_s(i) \quad (3)$$

$$ST_{right} = \sum_{i \geq right} T_s(i) \quad (4)$$

$$ET = ST_{left} - ST_{right} \quad (5)$$

这里,  $ST_{left}$ ,  $ST_{right}$  分别为自左节点和右节点累加到源节点的视在精确矩之和,  $i \geq left$  和  $i \geq right$  分别表示自联络开关的左节点和右节点起逆流而上所遇到的节点。

各节点流入的支路功率计算可采用简化算法即可。即  $P_{bi}$  和  $Q_{bi}$  可以分别表示如下:

$$P_{bi} = \sum_{j \subseteq i} P_j \quad (6)$$

$$Q_{bi} = \sum_{j \subseteq i} Q_j \quad (7)$$

其中  $P_j$  和  $Q_j$  分别为节点  $j$  的负荷有功和无功,  $j \subseteq i$  表示自  $i$  节点顺着功率流向所遇到的节点。

当把源节点视为平衡支点时,  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  则相当于分别作用于平衡支点(源节点 0)的两“力矩”。如图 2 所示。从图 2 可以看出  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  相差越大,也即  $ET$  值越大,说明联络开关两端的负荷分布越不平衡;反之,  $ET$  越小,说明开关两端的支路负荷平衡较好。因此  $ET$  反映了系统的平衡程度。

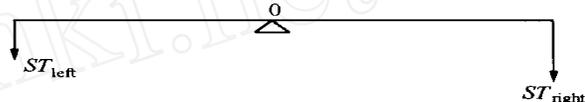


图 2 矩法示意图

由此我们得到了均衡矩法的基本思想:以  $ET$  作为衡量系统负荷平衡的依据,即通过重构尽可能使各开关两端的视在精确矩达到均衡。接下来将详述闭合开关和开断开关的选取原则。

### 2.3 闭合开关的选择

由于一次闭合多个开关会形成环网,从而会使计算精度受到影响。所以本文仍然选择一次闭合一个开关的思想。

如前所述,  $ET$  反映的是联络开关两端视在精确矩和的差,所以自开关左节点和右节点逆流而上所遇到的共同的父节点项抵消了,再加上那些节点所带的侧枝节点总可以进行等值处理,因此对任一待闭合的开关,总可以得到如图 3 所示的网络简化图。

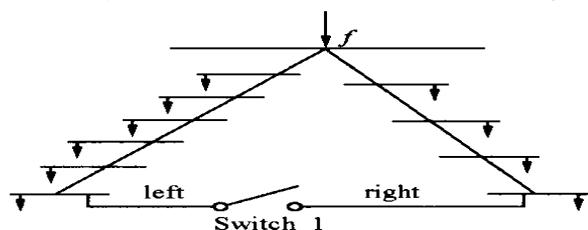
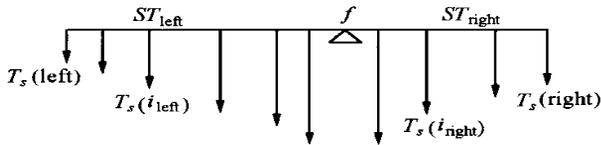


图 3 简化网络图

图 3 中所示的开关 1(Switch 1)的左、右节点各自逆流而上所遇到的第一个共同的父节点  $f$  即是开关 1 所对应的平衡支点,逆流而上所遇到的各节点对平衡支点的作用如图 4 所示。

图 4 中,  $T_s(left)$  和  $T_s(right)$  分别表示开关左、右节点的视在精确矩;  $T_s(i_{left})$  和  $T_s(i_{right})$  则分别表示

图4 求取  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  的“力矩”示意图

自左、右节点各自逆流而上所遇到的节点  $i$  的视在精确矩。

从图4可以看出,  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  分别反映了联络开关两端支路的负载情况, 这两个值相差越大, 亦即  $ET$  越大, 则待合开关两端的负荷分布越不平衡, 易出现一条支路负载过轻, 而另一条支路负载过重的情况。

因此, 本文闭合开关的原则是: 选取具有最大的  $ET$  值的开关闭合以获得最大的支路平衡效益, 这与文<sup>[1][4]</sup>指出合两端电压差最大的开关可获得最大的网损下降是一致的。

当合上一开关后, 形成了单环网, 欲恢复配电网的辐射状结构, 必须开断单环网中的某一支路。

#### 2.4 开断开关的选择

假设图3的开关1合上后, 则形成如图5所示的单环网。那么应开断单环网内哪一条支路才能获得最大的重构效益呢?

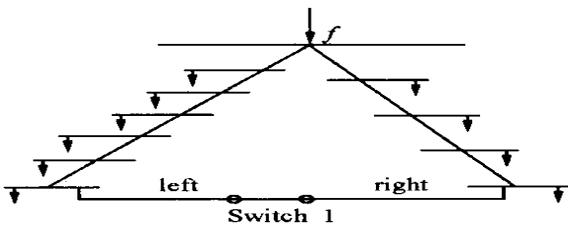


图5 由图3形成的单环网图

从闭合开关选取的原则我们可以得到启示: 开关的开断选择同样也应基于负荷平衡的思想, 即开断后的支路应使开断开关两端的视在精确矩均衡, 从而使得支路负载平衡。因此我们应选择单环网内支路两端的  $ET$  值最小的打开, 即在单环网内找到一条支路, 使得该支路两端所对应的  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  的差值  $ET$  最小。当  $ET=0$  时, 开断该支路后达到如图6所示的效果: 平衡支点  $f$  两边的负荷分布较均匀, 开断支路两边的支路负载较重构前平衡, 因而以  $f$  为支点的“杠杆”处于平衡态, 也即此时的系统具有较小的网损, 支路不易出现过负荷的情形, 整个系统也较重构前稳定。

由于开关的闭合可能引起较大的负荷转移, 因而采用重构前的电压值作为计算视在精确矩的依

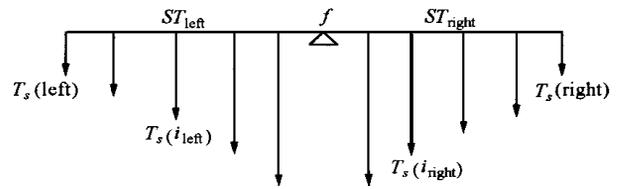


图6 开断支路后处于平衡态的示意图

据, 易引起较大的误差。为了较准确地进行开关的开断操作, 首先我们必须进行开关闭合后的单环网潮流计算, 然后对单环网内的各条支路模拟开断操作, 用单环网潮流计算求出的环网各节点的电压值逐个计算每条支路的  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  以及它们的差值  $ET$ 。选择环网内具有最小值  $ET$  的支路开断以达到最佳的均衡负荷的目的。

#### 2.5 计算步骤

- (1) 输入原始数据;
- (2) 计算辐射网潮流;
- (3) 根据式(3~7), 依次求取得待闭合开关集合中每个开关对应的左、右节点的  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  以及  $ET$  值并对  $ET$  进行从大到小的排列, 以确定待合开关。
- (4) 合上具有最大  $ET$  值的待合开关, 形成单环网。

(5) 在通过单环网潮流计算出环网各节点电压后, 对单环网内的各条支路模拟开断操作, 以节点  $f$  为平衡支点, 逐个计算每条支路的  $ST_{left}$  和  $ST_{right}$  以及它们的差值  $ET$ 。对  $ET$  进行从小到大的排列, 选择环网内具有最小  $ET$  的支路进行开断。

(6) 若待开支路与刚合上的支路相同, 则说明该开关已处于平衡状态, 无需再平衡, 将它排列到待合开关的序列尾端, 重选新序列第一个作为待合开关, 返回(4)。若所有开关都已平衡, 转(8)。

(7) 打开待开开关, 修正网络结构, 转(2)。

(8) 输出结果。

### 3 算例计算结果

本文提出的均衡视在精确矩法在两个标准算例: 33节点系统和69节点系统上分别进行了验证, 并将计算结果和其它文献提出的方法的运算结果进行了比较。

#### 3.1 33节点5联络开关系统

表1和表2分别列出了文献<sup>[3]</sup>以及本文提出的均衡矩法的计算结果。

表1 文献<sup>[3]</sup>的计算结果(单位:kW)

序号	合支路	开支路	实际网损
1	35	8	152.72207
2	36	32	150.45173
3	33	7	145.79833
4	8	10	142.09336
5	34	14	140.57276
6	10	9	139.00883

表2 均衡“视在精确矩法”的计算结果(单位:kW)

序号	合支路	开支路	实际网损
1	35	7	158.1723
2	36	32	158.1612
3	33	11	146.3272
4	34	14	147.0021
5	11	9	140.1025

文献<sup>[3]</sup>算得的初始网损为 200.81191kW,经过 6 次开关操作,得到重构后的网损为 139.00883kW。本文算得的初始网损为 201.1654kW,经过 5 次开关操作得到重构后的网损为 140.1025kW。由于各自所采用的潮流计算方法不同,因而算得的网损略有不同。

对此系统,文<sup>[2][3]</sup>以及本文的算法都得到了相同的最优网络结构,但文<sup>[2]</sup>需要 7 次开关操作,出现了 3 次重复操作(限于篇幅的关系,这里没有列出文<sup>[2]</sup>的详细结果);文<sup>[3]</sup>需要 6 次开关操作,其中有 2 次属于重复操作;而本文提出的均衡矩法仅用了 5 次开关操作就达到了和文献<sup>[2][3]</sup>相同的优化网架结构,仅出现了一次重复操作。

### 3.2 69 节点 8 联络开关系统

对此系统,表 3 和表 4 分别列出了文献<sup>[3]</sup>和本文提出的均衡矩法的计算结果。

文献<sup>[3]</sup>重构前的网损为 222.20269kW,经过 6 次开关操作,得到重构后的网损为 128.45207kW。本文算得的初始网损为 222.8443kW,经过 7 次开关操作,得到重构后的网损为 127.3040kW。

由表 3 和表 4 可以看出,对于 69 节点 8 联络开关系统,本文算得初始网损和文<sup>[3]</sup>算得初始网损很接近。虽然用本文的均衡视在精确矩法比文<sup>[3]</sup>多一次重复操作,但本文得到了比文<sup>[3]</sup>更优的网络结构,文献<sup>[3]</sup>的最终网损为 128.45kW,而本文算得的最终网损仅为 127.3kW,仅出现了一次重复操作。

表3 文献<sup>[3]</sup>的计算结果(单位:kW)

序号	合支路	开支路	实际网损
1	70	51	170.88634
2	72	11	144.72359
3	74	16	138.11183
4	76	54	134.08102
5	69	9	128.78251
6	71	13	128.45207

表4 均衡视在精确矩法计算结果(单位:kW)

序号	合支路	开支路	实际网损
1	70	51	169.6929
2	72	9	149.3622
3	69	12	135.3569
4	76	54	132.7958
5	74	17	128.2644
6	12	11	127.2533
7	71	13	127.3040

## 4 结论

本文从负荷平衡角度考虑了配电网重构问题,提出了视在精确矩的概念。本文提出的均衡矩法用  $ET$  量来衡量支路负载的平衡尺度,用该量来确定闭合开关和开断开关的选择。从矩平衡的角度去理解配电网重构问题,物理意义清晰。实验结果表明,视在精确矩法较好地反映了平衡的思想,按视在精确矩法进行的重构算法具有简捷性和有效性的特点。

### 参考文献:

- [1] Dariush Shirmohammadi and H Wayne Hong. Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction. IEEE Trans on PWRD, 1989, 4(2): 1492 - 1498.
- [2] Gosami S K and Basu S K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization. IEEE Trans on PWRD, 1992, 7(3): 1484 - 1491.
- [3] 赵军. 配电网重构的均衡算法. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 1996.
- [4] Baran M E and Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. IEEE Trans on PWRD, 1989, 4(1): 1401 - 1407.
- [5] 胡敏优, 陈元. 配电系统最优网络重构的模拟退火法. 电力系统自动化, 1994, 18(2): 24 - 28.
- [6] Kyung - Hee Jung, Hoyong Kim, Yunseok Ko. Network Reconfiguration Algorithms for Automated Distribution Systems

Based on Artificial Intelligence Approach. IEEE Trans on Power Delivery. 1993,8(4): 1933 - 1941.

- [7] Gregory Levitin, Shmuel Mazal Tov, David Elmakis. Genetic Algorithm for Optimal Sectionalizing in Radial Distribution Systems with Alternative Supply. Electric Power Systems Research, 1995, 35(3): 149 - 155.

收稿日期: 2000-05-21

作者简介: 蔡中勤(1973-),女,博士研究生,研究方向为配电网网络分析; 郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,研究方向为计算机在电力系统中的应用,光学电流互感器等; 陈学允(1934-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,主要从事电力系统稳定分析及控制方面的研究。

### Poised apparent accurate moment method for network reconfiguration in distribution systems

CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong, CHEN Xue-yun  
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** On the consideration of the radial characteristics of distribution network, the concept of apparent accurate moment (AAM) is proposed, which is analogous to that of moment of force in mechanics. The essence of network reconfiguration lies in the aim of load balance by switch operation. Based on this idea and the definition of the AAM, a new method for distribution reconfiguration—poised apparent accurate moment method (PAAM) is proposed, that is, the switch closing and opening depends on whether the AAM between the two ends of the switch poises or not. The PAAM method measures the balance degree of branches by means of the difference ET of the summation of the AAM between the two ends of the switch. The key point of network reconfiguration is to decide which switch to be opened and which one to be closed. Based on the idea of the load balance, we think that the switch which has the maximal ET value should be closed first and the branch which has the minimal ET value in the single loop formed just now should be opened so that we can benefit most from the reconfiguration. The AAM presented in this paper reflects the idea of load balance preferably and the detailed explanation for it is also given. This algorithm is tested on two experimental systems and a comparison is made between this method and others, which shows the effectivity and simplicity of this method.

**Keywords:** distribution network; apparent accurate moment; reconfiguration

(上接第3页)

**Abstract:** Wavelet analysis has excellent localization nature in time and frequency domain, and it can change the time and frequency windows according to the variation of signals frequency, so utilizing it can detect the singularity of signals efficiently. In this paper we analyze the singularity of fault transient signals in power system and get its particularity, then give the algorithm of detecting singularity of fault transient signals with wavelet transform which confirm the accurate detection of distinguished vertex.

**Keywords:** wavelet analysis; singularity; fault transient signals; extraction at fault time

(上接第7页)

收稿日期: 2000-06-13

基金项目: 中华电力教育基金会许继奖教金资助项目

作者简介: 黄登峰(1976-),男,硕士,研究方向为人工智能在电力系统中的应用; 郁惟镛(1940-),教授,博导,从事电力系统继电保护及综合自动化研究。

### A new algorithm of distinguishing magnetizing inrush current based on fuzzy multi-criteria

HUANG Deng-feng, YU Wei-yong, ZHAO Liang, WANG Hui-fen  
(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** After analyzing the schemes of transformer protection in existence, we present a new algorithm based on fuzzy set theory, which integrates the merits of all the other rules. All principles are verified by the EMTP, the result shows that the new algorithm is useful and can discriminate the inrush and fault current not only quickly, but also reliably.

**Keywords:** transformer protection; magnetizing inrush current; fuzzy set theory