

配电系统联络开关的优化配置

王守相¹, 王成山²

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 天津大学电气自动化与能源工程学院, 天津 300072)

摘要: 将联络开关优化配置的目标设为以提高系统可靠性原则为前提, 寻求使网络重构得到的系统网损最小的配置方案。提出了两个启发式准则, 即根据联络开关的分类和待联接联络开关的端点的电压差来指导联络开关的优化配置, 并采用一种新的高效并行的可处理大规模三相不平衡配电系统的网络重构算法来保证获得网络重构的优化结果。算例表明该启发式算法对三相平衡和不平衡系统都是快捷和有效的。

关键词: 配电系统; 联络开关配置; 网络重构

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)12-0024-04

1 引言

配电系统中普遍存在着两类开关, 即联络开关和分段开关。

联络开关是在两条主馈线、两个变电站或者环路型式的分支线之间起联络作用的开关, 通常情况下是断开的; 分段开关则是安置在两个线路段之间, 把一条长线路分成了许多个线路段的开关, 通常情况下是闭合的。这两类开关在配电系统中主要起着两方面的作用, 一是为了进行故障隔离和供电恢复, 以减少停电时间, 提高系统的可靠性; 二是对系统进行结构优化, 即配电网重构, 也即在联络开关和分段开关的配置一定的情况下, 通过切换联络开关和分段开关的开/合状态来改变网络的拓扑, 以寻找优化网络结构, 最终达到减少网损和平衡负荷的目的。

在不同的开关配置下, 网络的优化结构是不同的。为此, 本文提出了以遵循提高系统可靠性的原则为前提, 使重构得到的网络网损最小的配电系统开关的优化配置问题。由于一般假定每条线路上都安装有分段开关(这在实践中是可行的), 因而配电系统开关的优化配置问题也就变成了联络开关的优化配置问题。同时, 由于主馈线和分支线的数量巨大, 不可能在各条主馈线之间和各条分支线之间都安装联络开关。因此需要选择安装联络开关的地点(主馈线对和分支线对), 以实现有限数量联络开关的优化配置。

为了满足系统可靠性的基本要求, 本文首先提出以提高系统可靠性为目的的联络开关优化配置的基本原则, 然后在此基础上, 以重构得到的网络的网损最小为目标, 提出两个启发式准则, 即根据联络开关的分类和准备联接联络开关的端点的电压差来指

导联络开关的优化配置, 并采用一种新的高效并行的可处理大规模三相不平衡配电系统的网络重构算法^[1]来保证获得重构的优化结果。

2 提高系统可靠性的联络开关配置的基本原则

衡量配电系统可靠性的指标主要有: 系统平均停电频率、系统平均停电持续时间、系统平均负荷损失和系统平均停电能量损失等等^[2~4]。联络开关的合理配置可以提高这些可靠性指标。

为了尽量提高系统的可靠性, 联络开关的配置应该遵循下述基本原则。由于配电系统中变电站的数量相对于主馈线和分支线来说要少得多, 为了保证系统的可靠性, 一般要求在每两个相邻的变电站之间都配置联络开关, 以互为备用。而且每条主馈线一般也通过常开的联络开关与相邻的馈线相联。而一条主馈线上的每条分支线可以通过常开的联络开关与相邻的其它馈线上的分支线相联。有些情况下, 同一条主馈线上的各条分支线之间也可以通过常开的联络开关相联。

当一条馈线或馈线分支线上发生故障时, 将故障段隔离后, 要求能够从与之通过联络开关联接的其它馈线或馈线分支线得到足够的转移电量, 而不至于使这些线路过载, 以实现非故障段的供电恢复, 减少系统平均停电持续时间和停电能量损失, 从而提高配电系统的可靠性。

3 联络开关优化配置的启发式方法

联络开关优化配置的目标是在遵循以提高系统可靠性为目的的联络开关配置的基本原则的前提下, 寻找一个联络开关的最佳配置方案, 以使在此基

础上进行网络重构得到的系统结构的网损最小。

首先,将网络中所有的联络开关按照它们单个闭合后形成的环路之间的联系,进行下述分类:

第一类,在网络中单个闭合后形成的环路与其它联络开关单个闭合后形成的环路之间无公共开关的一类联络开关。

第二类,对两个联络开关,若它们单个闭合形成的两个环路间有公共开关,但与其它联络开关单个闭合后形成的环路之间再无公共开关,则将这两个联络开关归入这一类。

第三类,对三个联络开关,若它们单个闭合形成的三个环路间有公共开关,但与其它联络开关单个闭合后形成的环路之间再无公共开关,则将这三个联络开关归入这一类。

依次类推,可得第 k 类开关, $k=1, 2, \dots, n$ 。

假定已知系统待配置的联络开关的总数和可能联接联络开关的馈线的端点,本文给出了一种启发式方法来决定联络开关的优化配置方案,它采用下述两个启发式准则来决定开关的配置:

a. 只配置第一、二、三类联络开关,避免各个联络开关单个闭合后形成的环路之间的过多交叉。也就是说,各条主馈线或者各条分支线上最多接有三个联络开关,以与其它主馈线或者分支线相联。

b. 只有在安装联络开关的两个端点存在明显的电压差,才可能产生网损减少,且差值越大,降损潜力越大。为此在端点电压的差值较大的两条主馈线间或者两条分支线间,优先设置联络开关。因而,可以根据各条主馈线和各条分支线的端点电压差值的大小,设置一个指数 μ 来决定在哪两条馈线或分支线之间配置联络开关。

$$\mu = \frac{1}{\max\left(\sum_{i=1}^{n_{\text{open}}} |U_i|^2\right)} \quad (1)$$

$$\text{其中, } \frac{1}{\max\left(\sum_{i=1}^{n_{\text{open}}} |U_i|^2\right)} \quad (2)$$

n_{open} 为系统待配置的联络开关总数; U_i 为联络开关 i 两端的电压差。

可以看出, $0 \leq \mu \leq 1$ 。当所有联络开关两端的电压差都为零时, $\mu = 0$; 当联络开关两端的电压差的平方和取最大值时, $\mu = 1$ 。

这样,联络开关优化配置的目标函数可以写为:

$$\max(\mu) \quad (3)$$

s. t.

$$S_{L_i} \leq S_{ij_{\text{剩余}}}, (j = i, i = 1, 2, \dots, n_{\text{open}}) \quad (4)$$

其中: i 为与馈线(或馈线分支线) i 通过联络开关相联接的其它馈线(或馈线分支线)集合; S_{L_i} 为馈线(或馈线分支线) i 上的总负荷; $S_{ij_{\text{剩余}}}$ 为与馈线(或馈线分支线) i 通过联络开关相联接的其它馈线(或馈线分支线) j 的剩余容量。

约束条件(4)是为了保证当一条馈线或馈线分支线上发生故障时,将故障段隔离后,能够从与之通过联络开关联接的其它馈线或馈线分支线得到足够的转移电量,而不至于使这些线路过载,以提高系统的可靠性。

4 联络开关优化配置的操作步骤

在已知网络中准备连接的联络开关的数量和端点位置的情况下,可采用下列步骤决定在哪两个端点间连接联络开关:

第 1 步,运行三相潮流,求得准备连接联络开关的各端点的电压 U_i , ($i=1, 2, \dots, 2n_{\text{open}} - 1, 2n_{\text{open}}$)。

第 2 步,根据各端点的电压的幅值由大到小排序为 $\{U_i^s\}$, ($i=1, 2, \dots, 2n_{\text{open}}$), 求得系数

$$= 1/\max\left(\sum_{i=1}^{n_{\text{open}}} |U_i|^2\right) = 1/\left(\sum_{i=1}^{n_{\text{open}}} |U_i - U_{2n_{\text{open}} - i + 1}|^2\right)。$$

第 3 步,求得各个可能的联络开关配置方案的指数 μ 。

第 4 步,验证使指数 μ 取最大的联络开关配置方案是否满足当系统中任一条馈线(或馈线分支线)故障时,能够为非故障段可靠地恢复供电的要求。若满足 $S_{L_i} \leq \sum S_{ij_{\text{剩余}}}$, ($j = i, i=1, 2, \dots, n_{\text{open}}$), 则接受其为优化配置方案,否则,取对应下一个较大的 μ 值的方案验证。

第 5 步,直到找到一个可以接受的优化配置方案,结束。

5 算例结果及分析

本文采用的基本算例为文献[5]引入的 33 母线系统和文献[6]引入的 292 母线系统。33 母线系统是三相平衡系统,包含 1 条馈线,5 个联络开关,且每条线路上都接有分段开关,初始有功网损 207.7245 kW,电压最低点在节点 17,为 0.913091p. u.。292 母线系统作为 NYSEG 配电系统的一部分,是三相不平衡系统,包含 305 条线路,15 个联络开关和 30 个分段开关,6 台变压器,77 条分支线。

首先考察只配置一个联络开关的情况,将一个联络开关的一端固定在某一条馈线的端点上,然后

比较将该联络开关的另一端联接在其它馈线上不同的端点时的重构结果。算例结果示于表 1。

表 1 端电压差不同的联络开关配置方案与网络重构结果的关系

Tab. 1 Relationship among tie switches allocation, voltage difference between two terminals and reconfiguration result

测试系统	联络开关配置	联络开关两端电压差的绝对值/ p. u.	重构后有功网损/kW
33 母线系统 (初始网损 207.7245 kW)	17-18	0.0834	134.4487
	17-19	0.0798	147.5291
	17-20	0.0791	150.0772
	17-21	0.0784	153.5472
	17-22	0.0662	160.9729
	17-23	0.0595	172.1163
	17-24	0.0562	178.1118
	17-25	0.0346	192.1531
	17-26	0.0320	194.9636
	17-27	0.0206	202.1531
	17-28	0.0124	205.3410
	17-29	0.0089	206.5202
	17-30	0.0047	207.4600
17-31	0.0038	207.6690	
17-32	0.0035	207.7245	
292 母线系统 (初始网损 328.4345 kW)	292-10	0.0790	279.2687
	292-11	0.0789	279.2698
	292-12	0.0788	279.8978
	292-14	0.0784	281.8365
	292-15	0.0783	282.0407
	292-16	0.0782	282.0412
	292-17	0.0781	282.2248
	292-20	0.0763	297.9101
	292-21	0.0751	306.5556
	292-23	0.0750	307.2622

由表 1 可以发现联络开关安装在端点电压差值较大的两条主馈线间或者两条分支线之间时,网损减少的数值较大。因此,本文提出启发式准则,即根据各条主馈线和各条分支线的末端电压差值的大小来决定在哪两条馈线或分支线之间配置联络开关。

以 33 母线系统为例,假定准备安装 5 个联络开关,且这些联络开关准备联接的各个馈线的端点已经确定,即联络开关的一端分别安装在端点 14, 20, 21, 28, 32, 33, 34, 35, 36, 37 上。采用本文启发式算法得到的优化配置方案示于表 2。并与初始方案和任选的一个方案就开关配置指数 μ 及重构结果进行了比较。

表 2 中的计算结果表明了联络开关配置指数 μ 在区间 $[0, 1]$ 分布, μ 越大,重构后的有功网损越小。若假设各条线路的容量足够大,足以满足系统供电

恢复的要求,则 $\mu = 1$ 时的配置方案为最优。本文为了简化分析,在开关配置时采纳了提高系统可靠性的基本原则,并在约束条件上对可靠性加以强化,而没有具体计算可靠性指标。若详细考虑和计算系统可靠性指标,则最优方案的 μ 值可能比 1 略小些。292 母线三相不平衡系统的计算结果同样表明了该启发式算法的快捷和有效性。

表 2 各种联络开关配置方案下的指数 μ 及重构结果比较

Tab. 2 Comparison of index μ and reconfiguration result of different selections of tie switches allocation

测试系统	联络开关配置	指数 μ	重构后有功网损(kW)
33 母线系统 (初始网损 207.7245 kW)	21-33	0.2037	168.859
	28-34		
	32-35		
	14-36		
	20-37		
	20-33		
	14-34	0.5977	143.218
	21-35		
	32-36		
	28-37		
	(初始配置)		
	32-33		
	28-34		
21-35	0.9333	132.560	
20-36	1	116.771	
14-37			
21-32			
28-33			
34-35			
20-36	1	116.771	
14-37			
(优化配置)			

6 结论

将联络开关优化配置的目标函数设为在遵循以提高系统可靠性为目的的联络开关优化配置的基本原则的前提下,寻找使系统网络重构后得到的网损最小的开关配置问题。

提出了一种启发式联络开关优化配置方法,根据联络开关的分类和准备联接联络开关的端点的电压差,采用了两个启发式准则来指导联络开关的优化配置。且对网络重构采用了一种新的高效并行的可处理大规模三相不平衡配电系统的算法来保证获得重构的优化结果。

算例结果表明该启发式算法对三相平衡和不平衡系统都是快捷和有效的。

参考文献:

- [1] 王守相,王成山. 一种隐含并行的大规模三相不平衡配电系统网络重构新算法[J]. 电力系统自动化,2000,24(19):34-38.
- [2] Soudi F, Tomovic K. Optimized Distribution Protection Using Binary Programming [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998,13(1):219-224.
- [3] Celli G, Pilo F. Optimal Sectionalizing Switches Allocation in Distribution Networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999,14(3):1167-1172.
- [4] Brown R E, Gupta S, Christie R D, et al. Automated Primary Distribution System Design: Reliability and Cost Optimization [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997,12(2):1017-1022.

- [5] Goswami S K, Basu S K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1992,17(3):1484-1491.
- [6] Wang Jir-Cheng, Chiang Hsiao-Dong, Darling Gary R. An Efficient Algorithm for Real Time Network Reconfiguration in Large Scale Unbalanced Distribution Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996,11(1):511-517.

收稿日期: 2002-05-23; 修回日期: 2002-07-17

作者简介:

王守相(1973-),男,博士,主要从事配电系统自动化和电力系统安全性分析方面的研究工作;

王成山(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化等方面的研究工作。

Optimal tie switches allocation in distribution systems

WANG Shou-xiang¹, WANG Cheng-shan²

(1. Electrical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084 China;

2. School of Electrical Automation and Energy Engineering, Tianjin University, Tianjing 300072 China)

Abstract: This paper sets the objective function of tie switches optimal allocation as finding an optimal allocation which will lead to the best reconfiguration result on the premise of enhancing system reliability. It proposes two heuristic criterions to direct the optimal allocation of tie switches. It adopts a novel efficient network reconfiguration algorithm to guarantee a global optimum solution, which can deal with large scale unbalance distribution systems. Test result proves the quickness and effectiveness of the proposed heuristic method in solving both three-phase balanced and unbalance systems.

Key words: distribution networks; tie switches allocation; network reconfiguration

(上接第 20 页)

- [2] 杨鹏,等. 电力系统微机保护中开平方浮点算法的改进 [J]. 电力自动化设备,2000(2):7-8.
- [3] 张克彦. 80C196 系列单片机高精度浮点运算及数制转换子程序 [J]. 单片机与嵌入式系统应用,2001(3):38-42.
- [4] 周良松,等. 单片机求相量幅值的一种较精确快速算法 [J]. 继电器,1993,21(3):11-14.
- [5] 孙涵芳. Intel 16 位单片机 [M]. 北京:北京航空航天大学

学出版社,1995.

收稿日期: 2002-05-17; 改回日期: 2002-07-19

作者简介:

磨少清(1974-),女,硕士,研究方向为自动控制、计算机监控及保护;

李啸骢(1959-),男,博士研究生,研究方向为励磁控制;

海涛(1974-),男,工程师,从事水电站的机电安装。

A fast and high - accuracy square root algorithm in microcomputer electrical quantity transducer

MO Shao-qing¹, LI Xiao-cong², HAI Tao², TANG Ling-ji³

(1. Guangxi University for Nationalities, Nanning 530004, China; 2. Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Guangxi Hydro & Electrical Equipment Installation Company, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on the analysis of the look-up table algorithm and the characteristics of floating point binary number, the square root algorithm has been developed in this paper. This developed algorithm is not only fast and accurate but also saving EMS memory. With this algorithm, the problems of over-consuming time and low accuracy that exist for the original square root algorithm have been improved. In the 80C196 microcomputer with 12MHz clock, the maximal computing time is less than 80 μ s the average computing time is 55 μ s and the error dose not exceed (6.1 $\times 10^{-3}$)% when using the proposed algorithm.

Key words: square root algorithm; look-up table method; floating point binary number; microcomputer electrical quantity transducer