

配电网重构的正交设计模型

廖学静

(四川德阳电业局, 四川 德阳 618000)

摘要:提出用正交设计的方法进行配电网重构。计及电压、容量以及负荷均衡等约束,给出了配电网重构的数学模型。正交设计是用于多因素试验的一种方法,它可以快速地找到较好的方案或可能的最优方案。同时针对配电网树状运行的特点,对正交表中给出的包含环网的开关组合进行了修正。应用所提出的算法对IEEE33节点算例进行了网络重构,给出了重构前后系统节点电压、网损的比较,重构结果显示了所提算法的正确性、可行性以及工程实用性。

关键词:配电网;正交设计;网损;重构

Abstract: A new reconfiguration method of distribution network based on orthogonal design is proposed, which considers the constraint of voltage, capability and balance of load. Orthogonal design is a method using multi-factor experimentation. It can find out better scheme or probable optimal scheme quickly, and the switch combination including ring network can be corrected. The calculation example shows the application of orthogonal design to distribution networks reconfiguration brings better effect.

Key words: distribution networks; orthogonal design; network loss; reconfiguration.

中图分类号:TM744 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)02-0023-04

随着电力体制改革的不断深入,经济性与可靠性必将成为电力公司关注的焦点。通过重构以获得最优网络结构,势必将为电力公司带来巨大的经济效益和社会效益。配电网具有闭环设计开环运行的特点,网络中常配置大量分段开关(常合,用于隔离故障)及少量联络开关(常开,用于提供可选的供电通路),因此在正常运行条件下可根据不同的负荷状况,改变开关的开/合状态以调整网络结构。一方面可降低网损;另一方面可使负荷在各线路和变压器之间尽量均衡^[1]。重构是提高配电网运行经济性、供电质量和安全性的重要手段。配电网重构是一个多目标非线性混合优化问题。目前,配电网重构的求解算法^[1~8]主要有:数学优化法、最优流模式(optimal flow pattern, OFP)、开关交换法(switch exchange method, SEM)和人工智能算法(artificial intelligence algorithm, AI)等几类^[4]。支路交换法^[1]首先形成一个辐射网,然后依次闭合开关,每闭合一联络开关形成一单环网,得出最优化条件断开一个开关,保持网络为辐射形。该方法固定节点注入电流,以优化理论为根据,把开关操作的组合问题变成开关的启发式单开问题,可指导实际的开关操作过程;计算中只需估算支路交换引起的网损变化,无需重新计算潮流,计算量较少。缺点是计算步数多,效率低,计算结果与初始网络结构有关,因此容易收敛于局部最优解。最优流模式法^[3]首先闭

合网络中的所有开关,形成有多个环的网孔系统。以纯电阻网络求得环网支路的电流分布(即最优流模式 OFP);然后将电流最小的支路断开,从而解开一个环,并重新计算最优潮流;如此重复,直至配电网变成辐射网。该算法中计算一次开关由合至开需计算一次潮流,计算量较大。但配电网重构的结果与初始网络状态无关,比较容易收敛于最优解。人工智能算法^[4],如遗传算法(GA)、人工神经网络法(ANN),模拟退火法(SA)等。其中遗传算法(GA)可以将支路的开关状态(0/1)直接用染色体编码表示,通过模拟生物进化的繁殖/交叉/变异操作,尝试改变各开关状态,寻找最优网络结构,且能以一定概率收敛于最优解,但这类方法的参数如交叉率、变异率等难于控制,很难形成统一有效的通用算法。文献^[7]将Tabu搜索运用于配电网重构。

对于组合优化的问题也可以用正交设计的方法来实现。如果列举各因素所有可能的组合状态,当然可以得到最优的组合,即所谓的全面试验。但这种方法的工作量将随因素个数按指数方式剧增。这种大工作量的试验既不经济,也无必要。正交设计是用于多因素试验的一种方法,它从全面试验中挑选出部分有代表的点进行试验,这些点具有“均匀”和“整齐”的特点。从而可以快速地找到较好的方案或可能的最优方案。

1 配电网重构的数学模型

配电网重构就是在安全可靠供电的前提下,通过改变网络中的开关状态,即选择不同的供电路径,以使系统总的有功损耗最小。

定义 1: 负荷均衡指标^[2] B_L , 由支路负荷均衡指标 B_{Li} 和系统均衡指标 B_{Lsys} 组成, B_{Li} 描述如下:

$$B_{Li} = \frac{S_i}{S_{imax}} \quad (1)$$

式中 S_i 为流过支路 i 的复功率, S_{imax} 为支路 i 的最大容量。

系统的负荷均衡指标 B_{Lsys} 的数学公式描述如下:

$$B_{Lsys} = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{S_i}{S_{imax}} \quad (2)$$

式中 n_b 表示系统中支路的总数。

数学意义上的负荷均衡就是使支路负荷均衡指标 B_{Li} 等于或近似等于系统负荷均衡指标 B_{Lsys} , 即满足

$$\frac{S_1}{S_{1max}} \approx \frac{S_2}{S_{2max}} \approx \dots \approx \frac{S_n}{S_{nmax}} \approx \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{S_i}{S_{imax}} \quad (3)$$

上式等价于

$$\max \left[\frac{S_i}{S_{imax}} - \frac{S_j}{S_{jmax}} \right] < \epsilon \quad (4)$$

其中, ϵ 为根据网络结构和系统运行要求等人为设定的任意小的数。

考虑负荷均衡的完整配电网重构的数学模型如下:

$$\min \sum_{i=1}^{n_b} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (5)$$

s.t.

$$\textcircled{1} V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (6)$$

$$\textcircled{2} S_i \leq S_{imax} \quad (7)$$

$$\textcircled{3} \max \left[\frac{S_i}{S_{imax}} - \frac{S_j}{S_{jmax}} \right] < \epsilon \quad (8)$$

④ 潮流方程

⑤ 树状约束

式中: r_i 为支路 i 的电阻; P_i 、 Q_i 为通过支路 i 的有功、无功功率; V_i 为支路 i 末节点电压; V_{imin} 以及 V_{imax} 分别为支路末节点的最低电压和最高电压限制。

2 基于正交设计的配网重构算法

2.1 正交设计基本原理

正交实验设计是用于多因素实验的一种方法,它是从全面实验中挑选出部分有代表的点进行实验。对于全体因素来说它是一种部分实验(即做了全面实验中的一部分),但对于其中任何两个因素来说却是带有等重复的全面实验,具有均衡分散性和整齐可比性。正交表是正交实验设计的基本工具,它是根据均衡分散的思想,运用组合数学理论在拉丁方和正交拉丁方的基础上构造的一种表格。

2.2 算法步骤

正交实验设计的方法和步骤:

1) 明确实验目的, 确定实验指标。

实验目的: 选择不同的供电路径, 以使系统总的有功损耗最小。

实验指标: 文中的实验指标为网络有功损耗。

2) 挑因素, 选水平。

如果直接将各可能动作开关作为正交试验的因素, 以开关的开合状态作为各因素的水平, 那么这种因素的全组合中绝大部分都是非连通图组合, 这将大大的削弱了正交试验的优势。为保证重构网络的连通性, 针对配电网的树状结构, 以带有分支线的节点为边界, 将网络分为不同的块, 以这些块作为因素。这些块中只有一个开关可以处于打开状态, 故其水平数为块中开关总数加 1。例如图 1(1) 中节点 7、13 都有分支线, 且在路径 7-11-16-13 上没有其他的带分支线的节点, 以它们为边界将开关 11、16、15 和节点 11、16 作为一个块, 即一个因素, 其水平数为 3。

3) 选择合适的正交表。

常用正交表的形式为 $L_A(p^q)$ 。“ L ”代表正交表, L 下标“ A ”表示有 A 个横行, 即要做 A 次实验; 括号内的指数“ q ”表示有 q 个纵列, 即最多允许安排的因素数是 q 个; 括号内的“ p ”表示表的主要部分有 p 种数字, 即因素有 p 个水平。选择正交表时首先要求表中水平个数与被考察的水平个数完全一致; 其次, 要求正交表的列数等于或大于被考察因素的个数。此外, 当实验时间短、成本低、方法易时, 可选次数多的表; 当实验时间长、成本高、难度大时, 选择实验次数少的表; 当实验要求精度高、结果准确时, 选择实验次数多的表。

4) 用正交表安排实验。

按因素水平表中的代号, 采用对号入座的办法, 将数据填入所选出的正交表中, 便得到实验计划表。此表的每一横行即代表要实验的一组条件。在实验

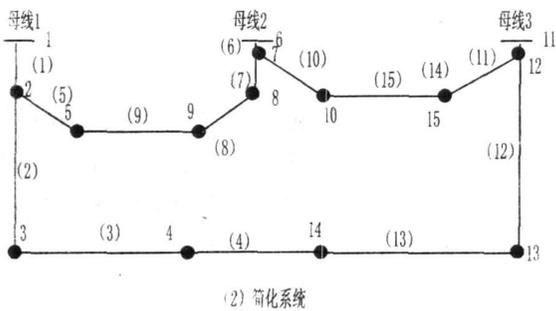
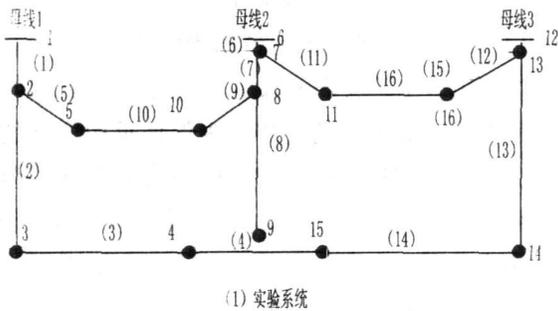
时,除考察因素外,其他条件应尽量保持不变,以便比较结果。

针对配电网闭环设计开环运行的特点,对正交表给出的包含环的开关组合作如下修正:在配电网中,一个联络开关对应一个环路。将因素以环路为单位分组,为保证配网开环运行,所以每一环路必需有一个开关处于打开状态,在此,选择离电源点逻辑连接关系最远的开关打开。

- 5)按实验方案进行实验。
- 6)实验结果直观分析。
- 7)实验验证。

3 算例分析

3.1 设计试验并实施



注:数字为节点号,带括号的数字为支路(或开关)号

图1 IEEE典型三馈线系统

用前述方法对 IEEE 典型三馈线系统^[14]进行了网络重构。该配电系统有3个联络开关。由于开关8必须闭合才能保证对节点9的供电,故而可以不考虑开关8,将网络简化为图1(2)。而与电源相连的开关永远闭合,因此图1(2)中开关1、6、11必须闭合,在网络重构过程中也可不予考虑。于是网络可以分为

3块,{开关5、7、8、9}、{开关10、14、15}、{开关2、3、4、12、13}。而每块必须有一个开关打开,故而选择正交表 $L_{25}(5^6)$ 进行重构。

3.2 试验数据分析

表1 计算结果

	打开开关	网损(MW)	最低电压(pu)
重构前	4/9/15	521.36	0.970 2
重构后	4/8/10	471.62	0.975 1

由表1可知,重构后系统网络损耗有大幅降低,由重构前的521.36 MW降到重构后的471.62 MW,系统最低电压也由0.970 2升高到0.975 1。而求解过程只需要计算由正交表给出的25个重构方案即可,计算量小,充分体现了模型的高效性。

4 结论

目前求解配网重构的方法很多,但大多数都比较复杂。上面利用正交设计的均衡性和正交性,以一部分有代表性的重构方案代替全部重构方案,并根据正交试验的方法求取较优的重构方案或可能的最优方案。通过IEEE33节点配电系统的重构结果表明所提模型的正确性、可行性。模型简单易懂,具有很高的计算效率和工程实用价值。

参考文献

- [1] Civanlar S, Grainger JJ, Yin II, et al. Lee. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(3): 1127-1223.
- [2] Baran ME, Wu FF. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [3] 雷健生, 邓佑满, 张伯明. 综合潮流模式及其在配电系统网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 57-62.
- [4] Huang YC. Enhanced genetic algorithm based fuzzy multi-objective approach to distribution network reconfiguration[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, Sept, 2002, 149(5): 615-620.
- [5] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网网络重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.
- [6] Bi Pengxiang, Liu Jian, Zhang Wenyuan. A refined branch-exchange algorithm for distribution on networks reconfiguration

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [7] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
- [8] 陈根军. 基于Tabu搜索的配电网络重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28-33.
- [9] Goswami SK, Basu SK. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1992, 17(3): 1484-1491.
- [10] 刘光中. 动态规划—理论及其应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991.
- [11] 钱颂迪, 吴运权. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [12] 谢开贵, 周家启. 树状网络潮流计算的新算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 116-120.
- [13] Xie Kaigui, Zhou Jiaqi. A new load flow algorithm for radial distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 116-120.
- [14] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-12231.

作者简介:

廖学静(1971~), 男, 四川什邡人, 硕士, 工程师, 德阳电业局总工程师, 从事技术管理工作。

(收稿日期: 2008-01-21)

云南变压器电气股份有限公司简介

云南变压器电气股份有限公司于1999年1月4日在云南变压器厂(建于1936年)的基础上成立, 属国有大二型企业、国家二级企业, 是国家定点生产220 kV及以下电压等级的变压器专业制造厂家之一。

云南变压器电气股份有限公司占地面积116 126 m², 现有职工750人, 其中工程技术人员113人。公司技术力量雄厚, 拥有一批从事变压器研制工作三十年以上, 经验丰富的工程师、技术人员及管理人员。

公司拥有各类设备400台(套), 其中引进的生产线和专业加工关键设备68台(套)。先进设备有: 从德国乔格公司引进的硅钢片自动纵、横剪切线和德国海德里希公司的300 m³煤油气相干燥设备、美国数控高速冲床、美国数控高速绕线机、意大利数控箔式绕线机、先进的表面处理车间、数控等离子切割机、500 t折弯机、立式绕线机、片式散热器生产线、160 t吊车、2 800 kV冲击电压发生器、2 000 kVA中频试验机组、7 500 kVA工频试验机组及其全套试验设备。

公司目前年生产能力600万kVA, 主要生产和经营10~240 000 kVA/10~220 kV电力变压器、铁道电气化用牵引变压器、特种变压器、H级绝缘干式变压器及组合式变压器, 计有十几大系列, 650多个规格容量, 全部采用国家标准和等效采用国际IEC标准。由法国TRANSFIX公司引进的专利技术, 经消化吸收, 二次开发出高原型H级绝缘“赛格迈(SECURAMID)”干式变压器, 达到国际20世纪90年代末先进水平, 投放市场后, 即获得用户的好评和欢迎, 且已通过两部鉴定。

为满足海拔4 500 m及以下高原地区的环境要求, 公司特别设计了高原型系列变压器, 该类变压器普遍运行于云、贵、川以及青海、西藏等地区, 并赢得了良好的信誉; 此外, 公司还专门研制了耐雷变压器、矿用变压器、农用变压器和最新型的S9、S10、S11系列全密封配电变压器系列产品。

云南变压器电气股份有限公司多年来十分注重计算机应用与管理, 在全国同行业中处于领先地位。目前拥有计算机100多台, CAD及CAPP已广泛应用于产品设计与工艺、企业管理信息系统, MIS已成熟应用多年, 实现了管理信息联网、自动控制、绘制图表和数据处理。目前, 公司四分之一的员工普及了计算机技术。

公司在巩固国内市场的同时, 还积极开拓国际市场, 且在多次国际招标中中标, 产品出口巴基斯坦、缅甸、越南、也门、苏丹、喀麦隆等国家和地区(其中1988年一次就出口巴基斯坦1850台小型全密封配电变压器)。

公司已取得ISO9001质量体系认证, 但此认证仅是一个起点。公司将本着“用户至上”的原则及“品质为本、不断创新、持续改进、增进顾客满意”的企业质量方针, 积极向广大用户提供技术先进、性能优良、质量可靠、价格合理的产品及周到、及时的售前、售后服务; 同时, 公司坚持以“满足客户的需求”为中心, 致力于与客户共同开发、研制新产品, 使公司的产品具有广泛的适用性, 且能更好地满足广大客户的需求; 另外, 公司也期望与广大海内外客商就产品销售、技术合作和资金引进等方面建立长期友好的合作关系。