

⑩ 配电系统经济运行自动控制技术——网络重构

42-45 陈星莺 潘学萍 廖迎春

单渊达

(河海大学电气工程学院 南京 210098)

(东南大学电气系 南京 210096)

摘要 对配电网络重构技术研究的历史和现状进行综述. 目前国内外对配电网络重构技术的研究涉及网络规划、实时控制、运行优化、故障恢复等广泛的领域. 本文重点介绍配电网络重构方法: 灵敏度法、状态空间搜索法、非线性-线性规划法、人工智能方法、模拟进化方法, 对不同的配电网络重构方法进行了对比和评述, 并力图寻找一种效果更好的组合优化方法.

关键词 配电自动化; 网络重构; 网络优化; 自动控制; 综合述评

经济运行

配电网络是电力生产和供应的最后一个环节, 配电自动化是整个电力系统自动化的一个重要组成部分, 其主要任务是保证配电网络的安全经济运行. 因此, 配电自动化近来已成为电力系统工作人员研究的热点. 网络重构 (feeder reconfiguration) 作为配电系统经济运行自动控制的一个重要问题已被极为关注. 网络重构的基本原理就是在满足系统约束条件下通过网络中分段开关和联络开关的分合来寻求一种符合某特定运行要求 (如使网损最小) 的拓扑结构. 实现最优配电网络重构的实质是求解非线性组合优化问题. 因此, 最优配电网络重构技术既可作为一种网络规划工具, 也可以作为一种实时控制的工具. 在规划中, 其作用是寻找一种满足负荷增长需求的网络结构, 使投资费用最小^[1]; 在实时控制中, 其作用为减少网损^[2-9], 平衡负荷分配^[5,10], 消除设备过负荷^[11], 改善电压分布, 提高供电可靠性^[12], 故障时进行恢复重构^[13,14]等等.

最优配电网络重构技术最早是由 Merlin 和 Back 于 1975 年提出来的^[15], 之后不断有研究成果发表, 提出了多种方法, 但迄今为止, 尚无一个公认的分类准则. 本文根据配电网络重构算法的实质, 在前人工作的基础上将其概括为以下几种: ①灵敏度法; ②状态空间搜索法; ③非线性-线性规划法; ④人工智能方法 (artificial intelligence approach); ⑤模拟进化方法 (simulated evolutionary method).

1 配电网络重构方法

1.1 灵敏度法

此类算法是直接计算各种刀闸状态下的潮流,

然后通过改变刀闸状态, 观察由其产生的网损变化量, 从而选出使网损下降的刀闸状态, 其实质是刀闸状态改变对网损灵敏度的计算. 文献[5]介绍了根据负荷分布和线路数量的不同, 将每一馈线分成若干个负荷段, 并假设每段的负荷分布均匀; 采用联络开关的位置作为变量, 假定其变化是连续的, 选用传统的优化方法, 不断改变带联络开关的线路段的位置, 直到目标函数——馈线的有功损耗最小. 文献[3]将变压器和馈线的非线性损耗近似成电流的线性传输费用, 把以网损最小为目标的网络重构问题近似成二次费用换车问题 (a quadratic cost transshipment problem). 文献[4]改进了计算损耗和负荷平衡的公式, 直接根据给定的网络结构、线路、负荷数据来计算损耗, 大大节约了计算时间. 文献[2]开发了有两个精度不同的辐射网潮流算法, 以支路交换 (一开一合) 的模式, 提出了另一个网损减量的估算公式, 并将其用于一个实际的配电网络, 表明了该算法的有效性. 文献[16]提出了一种新的潮流计算方法: 环路校正法. 该方法假设开环和闭环下的母线负荷电流相等, 并规定电阻性闭环回路的负荷潮流就是开环下的最优潮流, 因此, 只要先计算此最优潮流, 然后按一定顺序打开支路即可得最优网络结构.

总之, 灵敏度法比较简单、直观, 易于求解, 收敛速度快, 但由于计算结果是建立在一定的假设基础上, 计算精度有待改善; 同时其最优解的收敛性取决于网络的初始结构.

1.2 状态空间搜索法

状态空间搜索法中最典型的是采用启发式最佳优先搜索策略, 尽可能地消除违反约束条件的刀闸

状态组合,以缩小被搜索的状态空间,其所用启发式规则越有效,则搜索的解空间越小,速度越快。

文献[7]的基本原理是转换带有联络开关的支路以得到最优网络结构,其方法是逐一选择一对开关(联络开关和分段开关),先闭合联络开关形成环网,并等值成辐射形网络进行潮流计算,然后将流过电流最小的支路的分段开关打开,从而得到最优解。文献[17]对该方法提出了改进措施,以减少开关动作的次数。

虽然采用上述两种方法得到的每一步运算结果对应一个辐射形的拓扑结构,与配电网络辐射形运行状态相符,但其缺点是最终收敛性仍然取决于网络初始结构,并且每一对需动作的开关选择要花费很长时间,难以保证全局最优,不适合用于大规模配电网的网络重构。

1.3 非线性-线性规划法

1.3.1 分枝界面法

分枝界面法是将重构问题表达成一个非线性或线性规划问题,然后用已相对成熟的规划优化方法进行求解。Merlin 和 Back^[15]首先提出将此方法用于配电网络重构,基本原理是首先将所有开关闭合,然后根据与原网络相似的线性电阻网络模型来决定要打开的开关,不断重复,直至形成辐射网络。这个方法的优点是最终的网络结构不依赖网络开关的初始状态,并且问题的解算过程是趋于最优解答的。其主要缺点是用直流潮流算法来计算网络潮流,负荷为纯有功,用不能反映网络结构变化的电流源来表示,忽略了网络约束。文献[18]则在此基础上做了进一步的改进,假设负荷是随电压变化的连续电流负荷,把每一个闭合开关看成一个电流源,用一交流负荷潮流算法来计算网络潮流,选出最优解。

1.3.2 单回路优化法

单纯形法是解决线性规划问题的一种常用方法,受其启发,文献[19]提出了一种解决最优配电网络重构的单回路优化法(single-loop optimization method, SLOM)。SLOM 法将最优网络结构表示成一个整数优化问题,其目标函数为网络有功损耗,是电流的二次函数。求解时先寻找一个初始辐射结构为基本可行解,在此基础上,在打开的联络开关集合中搜索一个使其闭合,在闭合的分段开关集合中搜索一个使其打开,形成新的网络结构,并使网损有所减少,不断重复此过程,直至网损不再减少为止,对应的结构就是最优网络结构。

应用 SLOM 法解决配电网络重构问题,无需将目标函数近似成线性规划问题,并且其计算简单,效率高,解答可行,其不足之处在于要确定初始可行

解,同时对于大网络,花费时间较长。

1.3.3 二次规划法

二次规划类算法是将目标函数表示成某变量的二次函数,约束条件以线性关系表示,然后求解此二次规划问题的最优解^[8,9,15,20]。文献[15]最早提出了闭环 R 模式法,文献[8]进行了改进,提出一种最优流模式法,基本原理是首先在节点注入电流固定的情况下,将网络支路的阻抗换成电阻,求解网络的 KCL 和 KVL 方程,得到的支路电流分布将使网损最小。

规划类算法的优点是将配电网络重构这样复杂的组合优化问题变为优化潮流计算问题,计算次数与联络刀闸数是同一数量级,计算效率提高,精度也较好,但因最终大部分化成了线性规划问题或一阶搜索问题,其收敛性还有待研究。

1.4 人工智能方法

人工智能方法(AI)就是模拟工作人员在实际工作中用获得的经验进行操作所采用的方法,或模拟人脑思维所采用的方法,前者称为专家系统方法(expert system, ES),后者称为人工神经网络方法(artificial neural network, ANN)。

1.4.1 专家系统法

文献[21]将专家系统用于解决变压器或配电线路过负荷问题,采用专家系统与启发式规则相结合的方法,并用近似方法校验电压质量,结果表明所用方法可获得最优或次优解,而且所需时间较短。

1.4.2 人工神经网络法

人工神经网络法适用于映射复杂的非线性函数关系,文献[22]用 ANN 法进行网络重构以实现有功网损最小。该方法首先根据每个区域不同负荷的变化情况,用人工神经网络估计输入——初始网络结构和负荷水平,然后决定系统的输出——最优结构,即为一个包含输入-输出关系的样本。这种方法与传统方法不同之处在于不需要进行潮流计算,对神经网络的训练数据只需对应于不同初始结构和网络结构即可,因此,一旦 ANN 权值给定,只要给定输入,马上可以得到输出。由于神经网络具有非线性映射较强的并行计算能力和抗干扰能力,有潜力实现在线实时控制。ANN 法的不足之处在于其最优解与训练组的数据有很大关系,而配电网络的结构与负荷变化非常频繁,ANN 权值常需要重新更换,从而限制了其实用性,而且训练过程中有时会出现“麻痹”现象,究竟应选用多大的 ANN 节点规模尚无理论指导。

1.5 模拟进化方法

模拟进化方法是一种新兴的优化方法,强调算法的自适应,其运算过程与生物进化过程相仿,它于本世纪 60 年代提出,到 80 年代初才被普遍认同,90

年代开始用于电力系统.文献[9]概括了几种模拟进化方法:遗传算法(genetic algorithm, GA),遗传编程(genetic programming, GP),进化规划(evolutionary programming, EP),进化策略(evolution strategies, ES)和模拟退火法(simulated annealing, SA).模拟进化方法属于随机优化方法,理论上说,在优化过程中可以以较大的概率找到优化问题的全局最优解.迄今为止,用于配电网重构的模拟进化方法主要有模拟退火法^[19,23]和遗传算法^[24].

1.5.1 模拟退火法

SA法是1953年由Metropolis等人为了模拟熔融态固体热平衡的形成而提出的一种简单算法,即Metropolis抽样算法.1983年,Kirkpatrick等人首先将这一算法应用于求解组合优化问题,提出了模拟退火算法,即采用随机搜索迭代过程来寻求最优解.文献[19,23]将这一算法用于实现最优配电网重构.由于一个规模较大的配电系统会产生大量的待选结构,要对每一个网络状态进行网损计算,势必增加计算时间.事实上每一个新的网络结构都是在前一个网络结构的基础上通过对某一条或几条馈线做随机扰动而产生的,在假设电源电压恒定时,只需对扰动过的馈线进行有功网损增量的计算,即可得到整个系统的有功网损变化量,然后根据Metropolis接受准则判断是否接受为当前状态,若被接受,则修改当前网络结构,否则,放弃此待选结构.

SA法对目标函数无特殊要求,得到的是全局最优解,此解与初始可行解基本无关,SA法同时还能有效地克服“维数灾”,但是,SA法收敛的关键在于退火方案的选取,若选择不当,则需要大量的随机迭代,计算量大,得到的解与最优解相差甚远.

1.5.2 遗传算法

GA法是模拟进化方法中最主要的一种方法,由美国Michigan大学的Holland教授于60年代首先提出,基本思想是适者生存.经过几十年的努力,GA法已成功地应用于搜索、优化及机器学习等多个领域,它也是在电力系统应用最多的一个方法.

文献[24]首先将GA算法用于最优配电网重构,将网络的刀闸状态编码成二进制字符串,类似于生物中的基因链,每一个字符串对应一个适应度函数,考虑网络损耗及约束条件罚因子,将问题转化为一个混合的[0—1]规则问题,通过字符串进行“复制”、“杂交”和“变异”等操作,经过许多“代”的进化以后,从中选出适应度最大的字符串,即为最优网络结构.

模拟进化方法与传统的优化方法比较,它采用二进制码参加运算,不是变量本身.优化计算采用概

率搜索规则,从一组点开始搜索而不是一个点,对目标函数的要求不高,因而容易达到全局最优.但是,模拟进化方法的算法性能易受控制参数(如杂交率、变异率等)的影响,随机迭代次数多,尤其是当搜索点接近最优点时,搜索时间可能是前面的数倍^[24].

2 结 语

本文综述了最优配电网重构技术的各种方法,并进行了比较,由于各种方法均有各自的长处与短处,近年来研究人员已转向将某些方法结合^[20],如模糊控制与进化规划结合的方法,针对重构不同阶段的特点选用不同的算法,从而期望得到最佳效果,以满足实时应用;本文作者将模拟退火法(SA)、遗传算法(GA)、进化策略法(SE)及其彼此结合用于配电网重构,提出了一种将父代遗传最优行为与子代个体竞争最优行为深层相结合的方法,特别提出了一种适用于配电网重构的编码与解码方式,取得了较好的效果^[25,26].笔者认为如将人工智能、专家系统与模拟进化方法结合用于配电网重构将可得到更令人满意的结果.

参考文献

- 1 Hsu Yuan-Yih, Yi Jwo-Hwu. Planning of distribution feeder reconfiguration with protective device coordination. IEEE Transaction on PWRD, 1993, 8(3): 1340 ~ 1347
- 2 Mesut E B, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. IEEE Transaction on PWRD, 1989, 4(2): 1401 ~ 1407
- 3 Glamocanin V. Optimal loss reduction of distribution networks. IEEE Transaction on PWRD, 1990, 5(3): 774 ~ 781
- 4 Wang Jin-Cheng, Chiang Hsiao-Dong, Darling G R. An efficient algorithm for real-time network reconfiguration in large scale unbalanced distribution systems. IEEE Transaction on PWRD, 1996, 11(1): 511 ~ 517
- 5 Aoki K, Ichimori T, Kanezashi M. Normal state optimal load allocation in distribution systems. IEEE Transaction on PWRD, 1987, 2(1): 147 ~ 153
- 6 Taylor T, Lubkeman D. Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration. IEEE Transaction on PWRD, 1990, 5(1): 239 ~ 246
- 7 Civanlar S, Grainger J J, Yin H, Lee S S H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. IEEE Transaction on PWRD, 1988, 3(3): 1217 ~ 1223
- 8 Dariush Shirmohammadi, Hong H W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. IEEE Transaction on PWRD, 1989, 4(2): 1429 ~ 1498
- 9 Goswami S K, Basu S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. IEEE Transaction on PWRD, 1992, 7(3): 1484 ~ 1491
- 10 Hsu Yuan-Yih, Yi Jwo-Hwu, Liu S S, et al. Transformer and

- feeder load balancing using a heuristic search approach. IEEE Transaction on PWRD, 1993, 8(1): 184 ~ 190
- 11 Jung Kyung-Hee, Kim Hoyong, Ko Yunseok. Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligent approach. IEEE Transaction on PWRD, 1993, 8(4): 1933 ~ 1941
 - 12 Roytelman I, Melnik V, Lee S S H, Lugton R T. Mullet-objective feeder reconfiguration by distribution management system. IEEE Transaction on PWRD, 1996, 11(2): 661 ~ 667
 - 13 Sarma N D R, Prasel V C, Prakasarao K S, et al. A new network reconfiguration technique for service restoration in distribution networks. IEEE Transaction on PWRD, 1994, 9(4): 1936 ~ 1942
 - 14 Sarma N D R, Ghosh S, Prakasa Rao K S, et al. Real-time service restoration in distribution networks: a practical approach. IEEE Transaction on PWRD, 1994, 9(4): 2064 ~ 2070
 - 15 Merlin A, Bask H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in Urban Power Distribution Systems. In: Proc of 5th Power Systems Comp Con, Cambridge, UK, 1975. 2 ~ 6
 - 16 Roytelman I, Shahudehpour S M. Practical aspects of distribution automation in normal and emergency. Conditions, IEEE Transaction on Power Delivery, 1993, 8(4): 2002 ~ 2008
 - 17 Peponis G J, Papadopoulos M P, Hatziangrion N D. Distribution network reconfiguration to minimize resistive line losses. IEEE Transaction on Power Delivery, 1995, 10(3): 1338 ~ 1348
 - 18 Cassel W R. Distribution management systems: functions and pakback. IEEE Transaction on PWRD, 1993, 8(3): 796 ~ 801
 - 19 Chiang Hsiao-Dong, Rene Jean-Juneau. Optimal network re-configuration in distribution systems Part I: A new formulations and a solution methodology. IEEE Transaction on PWRD, 1990, 5(4): 1902 ~ 1909
 - 20 Song Y H, Wang G S, Johns A T, et al. Distribution network reconfiguration for loss reduction using fuzzy controlled evolutionary programming. IEE Proc-Gener Transm Distrib. 1997, 144(4): 345 ~ 350
 - 21 Jung Kyung-Hee, Kim Hoyog, Ko Yunseok. Network reconfiguration algorithm for automation distribution systems based on artificial intelligence approach. IEEE TPD, 1993, 8(4): 1933 ~ 1941
 - 22 Kim Hoyong, Ko Yunseoko, Jung Kyung-Hee. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution system. IEEE TPD, 1993, 8(3): 1356 ~ 1366
 - 23 Chiang Hsiao-Dong, Rene Jean-Juneau. Optimal network reconfiguration in distribution systems Part II: Solution, algorithm and numerical results. IEEE Transaction on PWRD, 1990, 5(4): 1568 ~ 1574
 - 24 Nara K, Shiiose A, Kitagwa M, et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration. IEEE Transaction on PWRD, 1992, 7(3): 1044 ~ 1051
 - 25 Chen Xingying, Shan Yuanda. Distribution network reconfiguration for loss reduction based on ESA. Journal of Shoutheast University(English edition), 1998, 14(2): 21 ~ 25
 - 26 Chen Xingying, Xiang B, Shan Yuanda. Distribution reconfiguration based on GSA. Proceeding CUS-EPSA, 1998, 14(2): 695 ~ 700

(收稿日期: 1998-10-23 编辑: 熊水斌)

·简讯·

德国风电装机跃居世界首位

风力发电是一种洁净而无污染的可再生能源,近年在世界上发展很快.德国是发展风电最快的国家,1994年它的风电装机才35万kW,次于美国和丹麦,居世界的第三位.

事隔2年,德国的风电有了飞速的发展,到1996年,其风电装机达到了150万kW,超过了丹麦,升到了世界的第二位.

1997年德国风电装机继续保持增长的势头,当年风电装机达到193万kW,从而超过了美国,跃居世界的首位.

1998年是德国新增风机容量最多的一年,又新增了风机1010台,风电装机增至280万kW,当年风电电量达45亿kW·h,风电在电力生产中的比重约占1%.

据德国环境部长估计,今后10年间,德国风电的比重将提高到3.5%.

当前世界上坝高超过140m的混凝土面板堆石坝

序号	坝名	国名	坝高 /m	坝顶长 /m	坝身体积 /万m ³	上游坡	下游坡	面板面积 /万m ²	建成年份
1	巴昆	马来西亚	205	740	1730	1.4	1.4	12.7	在建中
2	阿瓜米尔帕	墨西哥	187	640	1300	1.5	1.4	13.7	1993
3	天生桥一級	中国	178	1104	1800	1.4	1.4	17.2	1999
4	雅康布	委内瑞拉	162	107	250	1.5	1.6	1.35	1996
5	阿里亚	巴西	160	830	1300	1.4	1.4	13.9	1980
6	麦索考拉	希腊	152	300		1.4	1.5	5.1	1995
7	新埃克斯切克	美国	150	370	395	1.4	1.4		1966
8	钦古	巴西	150	850	1260	1.4	1.3	13.5	1997
9	萨尔瓦金娜	哥伦比亚	148	400	394	1.5	1.4	5.7	1983
10	塞格雷多	巴西	145	705	670	1.3	1.2~1.4	8.6	1992
11	安奇卡亚	哥伦比亚	140	280	240	1.4	1.4	2.2	1974

(吴冀高供稿)