

配电网电容器优化的研究

方兴¹, 郭志忠^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京许继电气有限公司, 北京 100085)

摘要: 电容器优化配置和投切是配电网优化的一项重要内容。回顾了电容器优化配置和投切的研究历史和发展现状, 侧重对电容器优化投切的各种算法进行了详细评述, 分析了各种算法的特点及存在的问题, 以促进该研究领域的进一步发展。

关键词: 配电网; 电容器; 配置; 投切; 算法

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)09-0060-05

0 引言

电容器作为配电网无功补偿的重要设备, 在配电网中被广泛使用。通过在配电网中合理地配置和控制电容器, 可以提高配电网的电压质量, 改善功率因素, 降低网络损耗, 增加系统容量。

配电网电容器优化问题分为规划和运行两大类。规划问题主要确定电容器的安装位置、类型和额定容量, 在满足电压约束的条件下使投资费用最低。规划问题也称电容器优化配置问题。运行问题是在现有无功设备配置(电容器的位置和最大容量已定)的基础上, 根据实际负荷的变化, 确定可投切电容器组的投切方案, 使网损(能耗)最小或运行费用最低。运行问题也称电容器优化投切问题。

自从上个世纪 50 年代以来, 并联电容器的效益问题一直得到科技工作者的关注, 有关文献非常多^[1,2], 但大都是从规划角度来研究(即电容器优化配置), 而从运行角度来研究电容器优化投切的文献较少。关于电容优化配置问题已有相关文献综述了其研究发展的过程^[3~6], 本文侧重对电容器优化投切问题的算法进行归纳总结。

1 电容器优化配置

电容器优化配置问题是在满足各种不同负荷水平的所有等式及不等式约束条件的情况下, 确定配电网中配置电容器的位置、大小以及数目以获得最大的收益。这是一个混合整数非线性组合优化问题, 目标函数不可微。文献[3~6]阐述了电容器优化配置问题的研究发展过程。

由于缺乏高效的计算工具, 早期普遍采用解析方法, 这要求目标函数是连续可微的。为得到这样的目标函数需要做一些与实际情况不符的简化假

设, 如认为电容的位置和大小是连续变量、馈线截面均等以及各点负荷按统一的模式变化等。尽管作了这些假设, 在多数情况下所得到的目标函数仍然相当复杂, 这类方法的主要缺点是所得优化结果与实际情况不符。

随着计算机技术的发展, 各种数学规划方法被应用于解决电容器优化配置问题, 其中部分方法能够将电容器的位置和大小当成离散变量处理, 这相对于解析方法来说是一大进步。该类方法虽然可以得到最优解, 但计算繁杂, 效率较低。

进入 90 年代以来, 启发式方法、人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANN)/专家系统方法、基于随机化优化技术的方法, 包括遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、模拟退火(Simulated Annealing, SA)以及禁忌搜索(Tabu Search, TS)等已在配电网电容器优化配置问题中得到应用。相对于解析方法和数学规划方法来说, 启发式方法以及专家系统方法直观, 易于理解, 实现起来简单, 但是不能确保得到最优解; 针对不同的配电网负荷状态, 将人工神经网络方法应用于电容器优化配置需要频繁训练样本, 对于一个有一定规模的配电网, 要得到所有可能的负荷模式是困难的, 而训练样本也需要大量的时间; 基于随机化优化技术的方法由于能有效处理不可微的目标函数, 特别适合于解决组合优化问题, 实践证明这些随机化优化方法具有比传统优化方法更好的全局寻优能力, 但其收敛性及计算速度有待进一步提高。

2 电容器优化投切

配电网电容器优化投切是用来决定配电网中已安装的电容器组在不同负荷状态下的投切策略(对于可调电容器组, 还要决定投切的组数), 以减

小系统运行时功率或能量损耗的一种运行控制手段。按照运用的优化方法不同,可以将其分为以下几类。

2.1 传统数学规划算法

1) 非线性规划

1982年, Grainger 等率先用非线性规划解决电容器优化问题,用恒电流模型模拟负荷和电容器,构造了相应的数学模型,并进行了一系列的研究工作^[7~10]。由于所构造的模型^[7~9]无法考虑元件的电压静特性,故具有一定的局限性。1985年, Grainger^[11]将研究推向深入,引入了标准化等效馈线的概念,解决了带旁支的较复杂配电网的无功电压控制问题,将其分解为电容器和电压调节器两个子问题,用非线性规划法求解。在电容器子问题中同时考虑了规划和运行,确定了在何处安装多大容量的电容器、以及如何控制这些固定的和可控的电容器以使年综合费用最低,即在考虑电容器安装费用的基础上通过优化投切电容器以最大限度地节约电能。上述文献中,只有文献[9]考虑到电容器的整数约束,且用分支定界法求解;文献[7,8,10,11]都把电容器的位置和大小当成连续变量,与实际不符。

2) 线性规划

邓佑满^[12]从实时控制角度研究电容器优化投切的台数问题,推导了其逐次线性整数规划模型,并提出了适合配电网电容器投切特点的对偶松弛解法和逐次归整法。所得模型简洁,求解过程无震荡现象,收敛快,计算量小。但优化结果依赖于网络的初始状态,对于同一个系统,当电容器给定的初值不同时,其优化结果不同,同时逐次归整所引起的误差取决于电容器的单台容量。作者在文献[13]中进一步用模糊集中的梯形模糊数考虑了预测负荷值的不确定性,并用逐次线性整数规划优化三相不平衡系统的电容器投切。

Teng J H 在文献[14,15]中分别考虑在不平衡和平衡配电系统中如何利用常用的线性规划技术实现电容器的实时优化控制。

3) 二次规划

Wang J C^[16]考虑不对称配电网中电容器优化问题,建立其数学模型,把问题分解成两个子问题:电容器配置问题和实时投切问题,并用二次整数规划法求解。

4) 动态规划

Hsu Y Y 等^[17]提出了一种确定未来 24 h 馈线

电容器最优投切策略的动态规划方法,其目标是在保证电压质量的同时使馈线线损最小,约束条件中包括对电容器投切次数的限制。如果把电容器的投切状态作为状态变量,当电容器较多时,动态规划会有维数灾。为克服采用动态规划可能出现的维数灾,作者将阶段 n 时的状态变量定义为从阶段 0 到 n 时的电容器总投切次数,此法显著降低了动态规划法在线计算的维数,加快了收敛速度,但计算量还是随电容器数量呈倍率增长,当电容器较多时,仍不理想,不足之处还在于将负荷当成恒电流处理。

利用传统数学优化理论,方法成熟,收敛性好,可以从理论上得到全局最优解,但是应用这些方法时为满足目标函数连续可微,往往需要做某些简化假设,这会使得优化结果和实际情况不符,从而在一定程度上限制了其应用范围。

2.2 人工神经网络类算法

ANN 方法的最大特点是可以通过样本的训练将输入与输出之间的非线性关系存储于神经元的权值中。Santos N I 用两级 ANN 实现电容器投切的实时控制。第一级 ANN 以母线的测量值(功率和电压)和电容器当前档位值为输入来预测负荷水平,第二级 ANN 根据负荷水平确定控制策略。Das 等人针对传统优化方法费时且不适合于在线应用问题,提出一种基于人工神经网络的方法。研究结果表明该方法比传统优化方法的计算速度快 100 倍以上^[19]。

2.3 基于随机化优化的方法

近年来,许多学者将基于随机化优化技术的方法(包括 SA、GA 以及 TS 等)应用于电力系统的研究和生产实践中,其中包括配电网的电容器优化投切。

1) 模拟退火算法(SA)

1990年,Chiang H D^[20]用 SA 算法确定电容器的安装位置、类型、容量以及不同负荷水平下电容器的投切方案,考虑了电容器的实际情况、负荷约束以及各种负荷水平下的运行约束,并以 69 节点系统为例进行了计算。随后作者将电容器优化问题从三相对称系统推广到不对称系统^[21],和文献[20]不同之处还在于考虑了负荷的电压静特性以及电容器更换问题,仍然用模拟退火法求解。王守相等^[22]也应用模拟退火算法解决配电电容器三相分相投切问题,算法考虑了配电系统实际的三相不平衡状况和系统日负荷变化曲线以及电容器的实际操作次数约束。

2) 遗传算法(GA)

文献[23]认为电容器操作次数对用户和电力公司都非常重要,应将操作次数作为一个单独的目标而不是约束条件来考虑。此时电容器优化投切包含两个重要的目标:馈线的日运行损耗最小,操作次数最小。这两个目标量纲不同且相互冲突,为解决该问题,作者提出了与遗传算法相结合的交互式折衷最优方法。该方法的显著特点是可以提供一组灵活的折衷最优解以帮助系统运行人员确定最佳电容器投切方案。

刘莉等人^[24]用遗传算法解决配电网电容器优化投切问题,克服了传统优化方法在处理电容器整数约束上的不足,对初始条件无任何要求,具备全局寻优能力。

3) 禁忌搜索(TS)

张学松^[25]提出了将TS用于解决配电网电容器整组(0~1)优化计划投切问题,并对同一问题分别用Tabu搜索方法和遗传算法处理的效率进行了比较,证实了TS收敛速度快。邓集祥等人^[26]在上文基础上对Tabu搜索方法的实际应用作了一些改进,并借助改进的遗传算法中的优化编码技术处理补偿电容器的分档优化投切问题。TS的不足是对初始解有较强的依赖性。

SA算法一般可以得到全局最优或全局次优解,但该方法对参数和退火方案的依赖性强,计算量大;GA虽然具有使用简单、鲁棒性强和易于并行化等优点,但其仍面临许多问题,如计算速度慢,选取不同的基因串会有不同的优化结果等;TS方法能够有效地求得全局最优解或局部最优解,但Tabu表的深度控制仍是其应用时的主要难点。

2.4 混合算法

近年来也有一些研究者致力于将传统数学规划法和智能法相结合的研究。文献[27]也采用类似的将ANN与动态规划相结合的方法来解决电容器的投切问题。这个方法分3步实施:首先,收集历史负荷数据,应用动态规划法离线确定最佳决策。其次,用ANN的两种归类算法对负荷曲线归类,在每一类中,将前一步求出的最佳决策取平均得到预调度表。最后,固定预调度表中可信度高的决策,再用动态规划法优化可信度低的决策,得到最终的控制方案。前两步离线进行,后一步在线应用。在线应用时由于状态变量数大大下降,计算速度大大加快了。ANN技术应用于控制的优点是在线计算快,特别适于实时控制。ANN离线训练时间长并不是主要缺点,问题的关键在于训练样本的获取。由于配电网

络负荷变化频繁,对应每一种负荷模式都需要大量的样本来训练ANN,这限制了其实用性。

Miu KN和Chiang HD研究了GA在三相不平衡配电网电容器优化配置及控制问题中的应用,构造了两级优化模型。一级优化用遗传算法确定一个可行解空间,二级优化采用基于灵敏度分析的启发式算法,用上一级所得到的可行解空间作为搜索的初值继续寻优。该方法花费的时间比单纯使用GA要少,但解的精度有所降低。

文献[29]提出改进的GA/TS混合算法并用于配电网电容器的实时投切,用GA求解初值,然后用TS求出最优解。

陈星莺等^[30]从经济运行的角度出发,以网损最小为目标函数建立了配电网无功优化控制问题,数学约束条件主要强调电容器投切次数的限制,采用模糊动态规划法计算配电网电容器的优化投切问题。混合算法可以将各方法的优点充分发挥出来,而避开其缺点,从这一点来说,这类算法很有发展前途,但是如何对各种算法“取长补短”,发挥各自优势,仍需要进一步研究。

3 结论

配电网电容器优化配置和投切问题属于大规模非线性组合优化问题。利用传统数学优化理论,方法成熟,收敛性好,可以从理论上得到全局最优解,但是这些方法大都要求目标函数连续可微,因此在应用时需要做某些简化假设,这会使得优化结果和实际情况不符,从而限制了其应用范围。基于ANN的算法可以在很短的时间内得出结果,但其精度取决于样本,而要获得完整的样本较困难,而且需要较长的时间训练样本。基于SA的算法从理论上可以获得全局最优解,但存在算法依赖参数和计算量大的缺点,可以应用于对计算速度要求不高的电容器优化配置及计划投切。GA虽然具备全局寻优能力,但其收敛性和计算量大限制了其应用。基于TS的算法由于列表的大小不易确定,过大或过小的列表都会影响TS的全局寻优能力。模糊数学和专家系统方法必须依赖于其他技术的发展。

综上所述,各种方法都有其优缺点,对于配电网电容器优化配置及计划投切问题,对计算速度要求不是很苛刻,可以牺牲计算速度以获得高精度解;而电容器实时投切对算法的计算速度提出了更高要求,如何提高算法的计算速度同时也使优化结果足够满意仍需进一步开展研究工作。

参考文献:

- [1] Capacitor Subcommittee of the IEEE Transmission and Distribution Committee. Bibliography on Power Capacitors 1975-1980 [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(7):2331-2334.
- [2] IEEE VAR Management Working Group of the IEEE System Control Subcommittee. Bibliography on Reactive Power and Voltage Control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2):361-370.
- [3] Bortignon G A, El-Hawary M E. Review of Capacitor Placement Techniques for Loss Reduction in Primary Feeders on Distribution Systems[A]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Canada:1995. 2:684-687.
- [4] Carlisle J C, El-Keib A A, Boyd D et al. A Review of Capacitor Placement Techniques on Distribution Feeders [A]. Proceedings of the 29th Symposium on System Theory. Tennessee:1997. 359-365.
- [5] Carlisle J C, El-Keib A A, Boyd D et al. Reactive Power Compensation on Distribution Feeders[A]. Proceedings of the 29th Symposium on System Theory. Tennessee:1997. 366-371.
- [6] Ng H N, Salama M M A, Chikhani A Y. Classification of Capacitor Allocation Techniques[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1):387-392.
- [7] Grainger J J, Lee S H, El-Keib A A. Design of a Realtime Switching Control Scheme for Capacitive Compensation of Distribution Feeders[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(8):2420-2428.
- [8] Grainger J J, Civanlar S, Lee S H. Optimal Design and Control Scheme for Continuous Capacitive Compensation of Distribution Feeders[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(10):3271-3278.
- [9] Grainger J J, Civanlar S, Clinard K N, et al. Discrete-tap Control Scheme for Capacitive Compensation of Distribution Feeders[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(8):2098-2107.
- [10] Grainger J J, Civanlar S, Clinard K N, et al. Optimal Voltage Dependent Continuous Time Control of Reactive Power on Primary Distribution Feeders[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(9):2714-2723.
- [11] Civanlar S, Grainger J J. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators, Part I: The Overall Problem; Part II: The Solution Problem; Part III: The Numerical Problem[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(11):3278-3297.
- [12] 邓佑满,张伯明,相年德 (DENG You-man, ZHANG Bo-ming, XIANG Nián-de). 配电网电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法 (A Successive Linear Integer Programming Method for Capacitor Switching on Distribution Systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1995, 15(6):375-383.
- [13] Deng Y M, Ren X J. Optimal Capacitor Switching with Fuzzy Load Model for Radial Distribution Systems[J]. IEEE Proc—Gener Transm and Distrib, 2003, 150(2):190-194.
- [14] Teng J H. A Linear Model for Real-time Capacitor Control in Unbalanced Distribution System [A]. IEEE 2000 Power Engineering Society Summer Meeting. 2000. 4:2391-2396.
- [15] Teng J H, Chang C Y. A Network-topology-based Capacitor Control Algorithm for Distribution Systems [A]. IEEE/ PES 2002 Transmission and Distribution Conference and Exhibition. 2002. 2:1158-1162.
- [16] Wang J C, Chiang H D, Miu K N, et al. Capacitor Placement and Real Time Control in Large Scale Unbalanced Distribution Systems: Loss Reduction Formula, Problem Formulation, Solution Methodology and Mathematics Justification; Numerical Studies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2):953-964.
- [17] Hsu Y Y, Kuo H C. Dispatch of Capacitors on Distribution System Using Dynamic Programming[J]. IEEE Proceedings - C, 1993, 140(6):433-438.
- [18] Santoso N I, Tan O T. Neural-net Real Time Control of Capacitors Installed on Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(1):266-272.
- [19] Das B, Verma P K. Artificial Neural Network-based Optimal Capacitor Switching in a Distribution System[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 60(1):55-62.
- [20] Chiang H D, Wang J C, Orville C, et al. Optimal Capacitor Placement in Distribution System, Part I: A New Formulation and the Overall Problem; Part II: Solution Algorithms and Numerical Results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2):634-649.
- [21] Chiang H D, Wang J C, Gary D. Optimal Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-scale Unbalanced Distribution Systems: System Modeling and A New Formulation; System Solution Algorithms and Numerical Studies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1):356-369.
- [22] 王守相,王成山,王剑 (WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan, WANG Jian). 配电电容器三相分相优化投切 (Optimal Capacitor Switching Phase by Phase in Distribution Systems) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2002, 26(8):16-20.
- [23] Kuo C C, Chang H C. Solving the Biobjective Scheduling of Switched Capacitors Using an Interactive Best-compromise Approach[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46(3):133-140.

- [24] 刘莉,陈学允,孙小平(LIU Li, CHEN Xue-yun, SUN Xi-ao-ping). 基于遗传算法的配电网电容器优化投切(Optimal Capacitor Switching in Distribution Networks with Genetic Method) [J]. 东北电力学院学报 (Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering), 1999, 19(4): 33-36.
- [25] 张学松,柳焯,于尔铿(ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng). 基于 Tabu 方法的配电电容器投切策略(The Strategy of Distribution Capacitor Scheme Based on Tabu Search) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1998, 22(2): 33-36.
- [26] 邓集祥,张弘鹏(DENG Ji-xiang, ZHANG Hong-peng). 用改进的 Tabu 搜索方法优化补偿电容器分档投切的研究(Optimization of on/off Strategy of Shunt Capacitor Based on Modified Tabu Search Method) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2000, 24(2): 46-49.
- [27] Hsu Y Y, Yang C C. A Hybrid Artificial Neural Network dynamic Programming Approach for Feeder Capacitor Scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1069-1075.
- [28] Miu KN, Chiang H D, Gary D. Capacitor Placement, Replacement and Control in Large Scale Distribution Systems by a GA-based Two-stage Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1160-1166.
- [29] 卢鸿宇,胡林献,刘莉,等(LU Hong-yu, HU Lin-xian, LIU Li, et al). 基于遗传算法和 TS 算法的配电网电容器实时优化投切策略(Application of Genetic Algorithm/Tabu Search Combination Algorithm in Distribution Network Real-time Planning) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2000, 24(11): 56-59.
- [30] 陈星莺,钱锋,杨素琴(CHEN Xing-ying, QIAN Feng, YANG Su-qin). 模糊动态规划法在配电网无功优化控制中的应用(Application of Fuzzy Dynamic Programming Approach to Optimal Reactive Power Control in Distribution System) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2003, 27(2): 68-71.

收稿日期: 2003-08-12

作者简介:

方兴(1975-),男,博士研究生,从事配电网方面的研究;

郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定分析与控制,电力系统的自动化、信息化和市场化,光电互感器等。

Study of algorithms for optimal capacitor placement and switching in distribution network

FANG Xing¹, GUO Zhi-zhong^{1,2}

(1. Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing XI Electric Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: Capacitor optimal placement and switching plays an important role in distribution network optimization. The state of technology in optimal capacitor placement and switching in distribution network is reviewed, and the existing approaches to solve capacitor switching problem are expounded. The features and main problems of the corresponding algorithms are analysed for further research and development in this field.

Key words: distribution network; capacitor; allocation; switching; algorithms

(上接第 19 页 continued from page 19)

An improved Fourier algorithm of Mho relay without influence of DC decay component

HA Heng-xu¹, WANG Xue-ming², ZHANG Bao-hui³, YUAN Weir-guang¹

(1. Luneng Jicheng Electronic Ltd, Jinan 250100, China; 2. Yantai Economic and Technique Development Zone, Yantai 264000, China; 3. Dept. of Electric Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: The Fourier algorithm based Mho relay has advantages of eliminating and restraining the influence of high frequency harmonics, however suffers the strong influence induced by DC decay components. Therefore, differential filter is used to eliminate the DC decay component before the measured signal came into the Mho relay. This paper describes an improved Mho relay algorithm, which can naturally eliminate the influence of DC decay component without any filters. The EMTP simulation shows that the proposed algorithm is better than the conventional processing method.

Key words: Mho relay; DC decay component; Fourier algorithm