

地区电网感性无功补偿优化配置方法

张勇军¹, 刘瀚林¹, 朱心铭²

(1. 广东省绿色能源技术重点实验室(华南理工大学), 广东省 广州市 510640;

2. 梅州供电局, 广东省 梅州市 514021)

Optimal Configuration of Inductive Reactive Power Compensators in Regional Power Network

ZHANG Yongjun¹, LIU Hanlin¹, ZHU Xinming²

(1. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology (South China University of Technology), Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 2. Meizhou Power Supply Bureau, Meizhou 514021, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The thinking and method to implement optimal configuration of inductive reactive power compensation for regional power network are proposed, and an inductive reactive power compensation model for regional power network, in which the voltage quality, cost of investment and operating cost optimization of whole network are considered, is built to solve the problem, namely in regional power network the voltage is near the upper limit that is caused by the surplus of capacitive reactive power due to grid-connection of large amount of distributed generations (DGs), for instance the small hydropower stations, during low load operation mode. The calculation of inductive reactive power optimization is performed for a certain regional power network, and the obtained results are compared with those results calculated by project estimation method and average power factor method. Simulation results show that after the optimal configuration of inductive reactive power compensation according to the proposed optimization scheme, the reactive power level and voltage level in the simulated region are evidently improved.

KEY WORDS: inductive reactive power compensation; low load operation mode; voltage quality; optimization of reactive power

摘要: 提出地区电网进行感性无功补偿优化规划的思路和方法, 建立了兼顾电压质量、投资成本和运行费用全网优化的地区电网感性无功补偿模型, 以解决由于小水电等分布式电源大量接入时在小运行方式下地区电网无功过剩电压偏高的问题。结合某地实际电网, 进行了感性无功优化计算, 比较了所提方法与工程估算法、平均功率因数法等方法的结果。仿真结果表明, 按照优化方案进行感性无功补偿配置后, 该地区的无功电压水平显著改善, 取得了较好的经济效益和社会效益。

关键词: 感性无功补偿; 小运行方式; 电压质量; 无功功率

优化

0 引言

高质量的电力供应已成为现代社会经济生活的迫切需求, 电力系统的中心任务就是保证电网安全、可靠、经济和优质运行。电压质量是电力系统电能质量中的重要指标之一, 系统运行方式的变化、潮流的流向以及高峰、低谷和季节性负荷变化都对电网电压产生很大影响, 在电力系统的诸多问题中, 电压波动造成的危害最为广泛^[1-3]。因此, 电压调控措施和手段一直是电力系统中热门的研究课题之一^[3-7]。

长期以来, 人们对电压问题的关注普遍集中在由无功缺乏而造成的电压偏低、网损偏大和可能导致的电压崩溃事故上。但随着电网的迅速发展, 其特点也相应发生改变, 主要体现在上层主网架的不断加强, 电缆线路在城市电网中的大量使用, 地区小水电等分布式电源大量接入并倒送功率到 220 kV 系统, 负荷峰谷差日益加大, 部分线路潮流较轻, 感性无功补偿不足, 在负荷低谷期或小运行方式下, 电压偏高甚至严重越限^[8-9]。由此造成无功难以就地平衡、线路无功流动增大、相邻地区或不同电压层间无功穿越增多、电压过高危及设备及电网安全运行等问题。

近年来多地频现由无功过剩导致电压偏高的情况, 加强感性无功补偿以抑制电压过高的手段逐渐引起重视^[10]。但现有无功补偿优化规划方法的文献, 主要仍集中在研究容性补偿问题^[11-14], 针对感性无功补偿的研究文献仍较少, 特别是对

220 kV 及以下地区电网感性无功补偿容量确定的研究基本处于空白。一般的工程估算法是根据无功就地平衡的原则,按照各个变电站的无功上送情况进行感性补偿配置;文献[10]提出发电厂平均功率因数的概念,认为将这一指标控制在 0.95~0.98 范围内所需的无功量即为感性无功补偿的需求总量,但如何确定各变电站的补偿容量和分组是需要进一步研究的。

本文将采用基于灾变遗传算法的无功优化软件,对地区电网小运行方式下的负荷最低谷潮流断面进行无功优化计算,得出包含补偿点及各点补偿容量的具体补偿方案。

1 数学模型

1.1 目标函数

进行感性无功补偿,需对地区电网进行无功优化规划计算,力求以最小的投资最大程度避免电压越限,并兼顾网损尽量降低的需求,来确定补偿点及补偿容量。无功规划主要考虑以下 3 个方面:输电的有功损耗、电压质量和无功装置的安装及维护费用。以年总支出费用最小为目标函数,涉及 2 方面:新增无功补偿设备的投资 I_C 和网络损耗的年运行费 O_C ,电压质量以约束的形式来体现。

新增补偿设备及配套设备的投资 I_C 包括 2 部分:无功补偿装置设备费(不定部分,与购买容量成正比)和配套安装费用(固定部分),如下式所示

$$I_C = \sum_{i \in N_{PQ}} (\alpha f_i + K_C Q_{Ci}) \quad (1)$$

式中: N_{PQ} 是 PQ 节点集; f_i 是节点 i 的安装费用; K_C 是无功补偿装置单价; Q_{Ci} 是节点 i 的安装容量。 α 是逻辑变量,当节点 i 有安装补偿装置时取 $\alpha=1$,否则, $\alpha=0$ 。

年运行费 O_C 指全年全网能损费用,但是考虑感性无功补偿通常只在负荷较小的时候投运,在中等及大方式下均处在退出运行状态,在计算 O_C 时可以小方式时段的网损费用,即

$$O_C = \beta \sum_{d \in N_d} (\tau_d \Delta P_d) \approx \beta \tau_{\min} \Delta P_{\min} \quad (2)$$

式中: β 为电能单价; N_d 负荷水平周期集; τ_d 是一年内负荷水平 d 的等效小时数; ΔP_d 为负荷水平 d 期间电网的有功损耗; τ_{\min} 为小方式计算小时数; ΔP_{\min} 为典型小方式下电网的有功损耗。

$$\Delta P_d = \sum_{\substack{k \in N_e \\ k=(i,j)}} g_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

式中: k 为支路号; N_e 为支路数集合; g_k 为支路 k 的电导; V_i 、 V_j 为负荷水平 d 期间支路 k 两端节点 i 、 j 的电压幅值; θ_{ij} 为 V_i 和 V_j 之间的相角差。式(2)中等号左边表示考虑到多种运行方式的较精确计算,约等号右边表示只考虑到单一运行方式(即按最小运行方式)的等效估算。

因此,综合以上式子得目标函数为

$$\min f_Q = \mu I_C + O_C \quad (4)$$

式中 μ 是投资的回收率。

1.2 约束条件

该目标的约束条件包括潮流方程(等式约束)和无功补偿容量、发电机无功出力、变压器抽头和电压幅值约束等不等式约束^[15-16]。

现在的问题就是在满足上述约束条件下,追求年总支出费用最小的目标。根据以上所确定的目标函数和约束条件,可将具体的优化模型表达为一般的数学模型

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: \mathbf{u} 为控制变量,括无功补偿装置的投入组数(容量)、可调变压器的抽头档位(变比)以及发电机机端电压幅值; \mathbf{x} 为状态变量,包括除平衡节点外其他各节点的电压相角、各 PQ 节点的电压幅值。

2 发电厂平均功率因数

文献[10]提出用发电厂平均功率因数 $\cos \phi_A$ 作为地区无功平衡评估指标,定义如下

$$\cos \phi_A = \cos[\arctan(\frac{Q_D + D_L + D_T}{P_G})] \quad (6)$$

式中: Q_D 为地区无功总负荷(感性为正,下同); D_L 为地区变压器感性无功损耗; D_T 为地区架空线/电缆平衡自身充电功率后的无功损耗; P_G 为地区发电厂总的有功出力。文献[8]中 $\cos \phi_A$ 在 0.95(迟相)~0.98(迟相)时,系统无功平衡情况较好。发电机运行在这个区间,向上、向下调整的裕度都较大,运行控制灵活方便,同时经济性较好。生产实践中,全网发电功率因数落在该区间时被认为是较理想的。

当其不在该范围内时,为使系统恢复良好的无功平衡状态,以 $\cos \phi'_A$ 作为目标值,在定义式的分子中增加一项 Q_X , Q_X 即为系统缺乏的感性无功补偿量

$$Q_X = P_G \tan \phi'_A - (Q_D + Q_L + Q_T) \quad (7)$$

利用式(7)可以计算出地区电网全网缺乏的感性无功补偿的总容量。

3 广东某地区电网无功电压分析

3.1 电网情况

该地区位于华南，水系发达，当地充分利用自然资源，兴建了大量小水电站作为分布式电源接入电网，另外由于当地经济欠发达，因此负荷水平相对较低。这种较为特殊的网架结构和负荷电源特性导致该地区电网有如下几个运行特点：

1) 小水电分布零散上网电压等级较低，一般在 110kV 以下。发电量受季节降水的影响比较大，发电量呈现季节性的特点，发电不均匀。

2) 电网建设偏重容性无功支撑，感性无功补偿相对比较薄弱，仅 3 个变电站装有电抗器。

3) 在不同运行方式下负荷量差异大，负荷峰谷差较大，负荷波动较为明显。

4) 在一般方式下，有部分母线电压偏高。而在小方式下，这种现象有一定程度的加重。

5) 夏季属于丰水期，小水电发电量大，导致夏季小方式下电压越上限情况比冬季小方式下更为严重。

由以上几点造成当地电网出现长期电压偏高的现象，尽管目前采用了各种调压手段，但依然无法调节电压至令人满意的范围。且电网运行难以满足无功分层分区就地平衡的需要，不但不利于经济运行，也威胁着运行的安全性。

3.2 小运行方式下的无功电压分析

为突出电网电压过高的问题，以该地区 2010 年夏季小方式和冬季小方式 2 种典型的低负荷运行方式进行分析研究。图 1 为该地区的 220kV 及以上的主网架示意图。

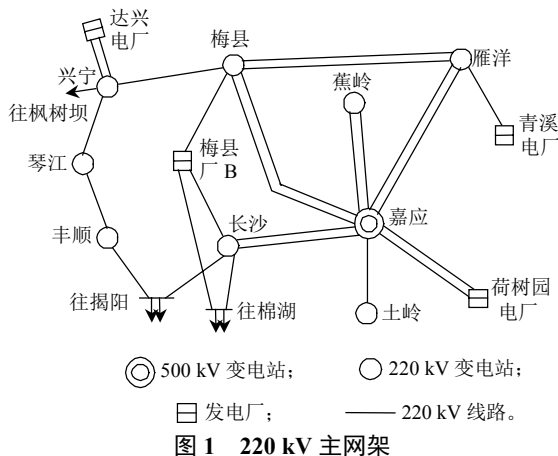


Fig. 1 Schematic diagram of 220 kV main networks

图 1 中的 220kV 上网的电厂均为当地出力较大的火电厂，小水电上网电压较低，且分布零散，故不在图中标出。另外，由于小水电属于分布式电源，出力较小且调压能力有限，因此在计算时不参与优化调压，并且根据所在运行方式下的潮流将小水电设为定功率输出的 PQ 节点，以负的负荷值作为其发电出力接入变电站。

表 1 为全网的变压器容量及无功补偿容量，由表 1 看出，该地区的并联电抗器感性无功补偿配置率偏低，另外从实际运行情况了解到，由于电网电压长期偏高，多数变电站的电容器均处于备用状态，电抗器则长期投入，在小方式下，即使投入电抗器电压仍然越上限。潮流及电压如表 2 所示。

表 1 无功补偿统计

电压等级/kV	变电总容量/MVA	并联电抗器/Mvar	电容补偿率/%	并联电抗器/Mvar	电抗补偿率/%
500	1000	200	20	180	18
220	2250	628	28	52	2
110	2540	525	21	0	0

表 2 潮流及电压汇总

计算量	夏季小方式	冬季小方式
地区无功负荷总量 Q_D /Mvar	+1.70	-4.27
变压器总无功损耗 Q_T /Mvar	+17.61	+15.27
计及充电功率后的线路无功损耗 Q_L /Mvar	-53.33	-102.45
地区总感性无功需求 $(Q_D+Q_T+Q_L)$ /Mvar	-34.02	-91.45
地区总发电有功 P_G /MW	+684.98	+219.41
总有功损耗 P_{Loss} /MW	+13.75	+3.27
母线电压平均标么值	+1.11	+1.09
电压越限母线数占总母线数的比例/%	60	51

注：+代表感性无功，-代表容性无功。

由表 2 看出，由于当地众多小水电的存在，发出的无功能够满足下层的无功负荷需求或有仍有盈余，故无功负荷总量较小甚至为负。2 种运行方式下的地区总感性无功需求量均为负值，说明当地存在无功过剩并倒送至上层电网的情况，而大量的无功功率长期上送不但增加了线路及变压器损耗，更对电网的安全运行构成威胁。

从 2 种运行方式下的潮流断面实际数据中可知，尽管当地主力电厂已经在极高的功率因数下运行，甚至部分机组进相运行，避免发出无功进一步抬高电压，但仍无法解决无功过剩电压居高不下的问题。为了充分利用小水电资源，同时避免出现电压越限的问题，必须加装并联电抗器等感性无功补偿装置，以吸收多余的无功功率，实现无功的就地平衡。

3.3 感性无功补偿规划计算

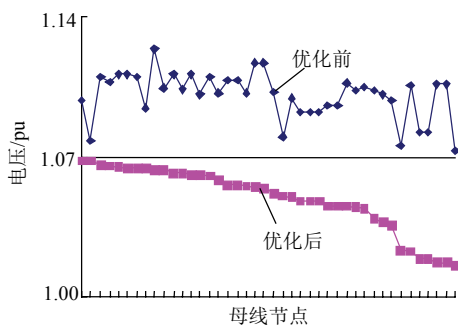
本文采用的潮流计算与无功优化计算软件来进行感性无功补偿优化计算。该软件可对电网各个组成部分进行建模，进行主网的潮流计算，并采用灾变遗传算法来实现无功优化配置与规划，以及无功优化调度。灾变遗传算法在遗传算法的基础上增加灾变因子，克服了传统遗传算法早熟收敛的缺陷，具有全局寻优能力强、搜索效率高等特点，适用于非线性、不连续、多不确定因素的无功优化问题。

采用 4 Mvar 单组容量电抗器，对该地区 2010 年夏季小方式和冬季小方式 2 种极端方式的潮流断面进行优化计算，使得补偿方案能够满足全年的需求，得出如表 3 所示的优化结果。

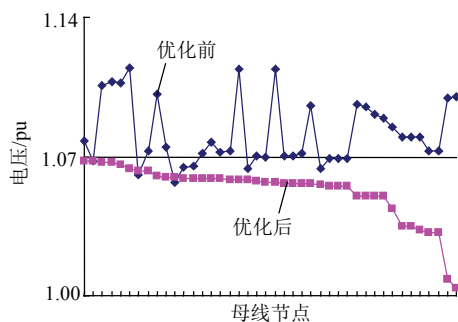
表 3 优化结果汇总
Tab. 3 Optimization results summary

计算量	运行方式	
	夏季小方式	冬季小方式
感性无功补偿总量 Q_x/Mvar	56.0	44.0
总有功损耗 $P_{\text{Loss}}/\text{MW}$	15.51	3.37
补偿后母线电压平均值/pu	1.053	1.049
补偿后电压越限母线数占总母线数的比例	0	0

经过感性无功补偿优化配置后，母线电压水平(对全网 220、110、10 kV 3 个电压等级的母线电压进行统计，以各级对应的标幺值作为统计量)明显得到改善，杜绝了越限的情况，优化前后的母线电压对比如图 2 所示。



(a) 夏季小方式



(b) 冬季小方式

图 2 母线电压对比

Fig. 2 Comparison of bus voltage

从优化前后的电压比较可以看出，在进行电抗器补偿前，母线电压基本都大于电压上限值 1.07 pu，冬季小方式尤为明显；经过补偿优化后，母线电压均回到合格范围内，而且从图中的电压分布情况看，大多集中在 1.05~1.06 pu 之间的良好状态，在保证电压安全合格的同时，还有较高的安全运行裕度，优化效果令人满意。

尽管增设电抗器会增加部分网损，但考虑到补偿前过高的电压对设备和电网可能造成的故障风险，进行电抗器补偿还是具有很强的可行性和必要性的。

3.4 结果对比与分析

如前文所述，由于无功过剩电压过高的问题近年来才愈发凸显，当前针对感性无功补偿的相关研究文献也较少，故较缺乏系统的理论方法和实践案例。将本文的优化结果与传统的工程估算法以及发电厂平均功率因数法的结果相比较，如表 4 所示。

表 4 无功补偿效果比较

Tab. 4 Comparison of reactive power compensation

计算结果	补偿总量/Mvar	
	夏季小方式	冬季小方式
本文优化结果(单组容量 4 Mvar)	56.0	44.0
工程估算法	102.2	88.0
发电厂平均功率因数法($\cos\phi_A=0.98$)	173.1	136.0

从计算结果对比可知，由于没有考虑电压和无功之间是相互影响关系，单纯从差额的角度进行计算，后 2 者的补偿总量明显大于本文的优化结果，将会造成投资的浪费。

优化效果比较，本文所提方法可以以最小的投资获得最大的电压调控效果；工程估算法根据每个变电站的上送无功进行补偿，而忽略站间的联系，缺乏对全网宏观的全局考虑，另外，由于上送无功量的不规律，难以采用统一规格的电抗器实现补偿，可操作性不强；发电厂平均功率因数法先评估全网有功与无功的关系，进而根据目标指标计算补偿量，但此方法受电网规模和运行方式等的影响很大，缺乏足够的准确性和具体的补偿方案。

4 结论

1) 感性无功补偿的优化计算应在最小运行方式下进行，方可满足电网全部运行状态的需求。

2) 进行无功补偿优化配置应考虑补偿前后无功与电压的相互影响，以免造成补偿过度及投资浪费。

3) 优化后应使电网电压在不越限的情况下处于较高水平, 以达到降低网损的目的。计算结果表明, 本文的提出的感性无功优化模型和方法具有很高的可行性与经济性, 对解决此类问题有良好的指导意义。

参考文献

- [1] Bollen M H J. Understanding power quality problems, voltage sags and interruption[M]. New York: IEEE Press, 2000: 3-51.
- [2] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
Xiao Xiangning, Xu Yonghai. Power quality analysis and its development[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 66-69(in Chinese).
- [3] 张勇军, 任震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.
Zhang Yongjun, Ren Zhen, Li Bangfeng. Survey on optimal reactive power dispatch of power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 50-56(in Chinese).
- [4] 马世英, 梁才浩, 张东霞, 等. 适用于大中城市电网的无功规划原则[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 49-53.
Ma Shiying, Liang Caihao, Zhang Dongxia, et al. Reactive power planning principles suitable to power networks in large-and medium-size cities[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 49-53(in Chinese).
- [5] 张程, 王主丁, 张宗益, 等. 一种规划态配网无功补偿估算方法[J]. 电力建设, 2010, 31(11): 24-27.
Zhang Cheng, Wang Zhuding, Zhang Zongyi, et al. A method for estimating reactive power compensation of distribution network planning[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(11): 24-27.
- [6] 陈刚, 马爱军, 张继红, 等. AVC分散控制模式下的变电站电压无功控制研究[J]. 电网技术, 2010, 35(12): 187-192.
Chen Gang, Ma Aijun, Zhang Jihong, et al. Voltage and reactive power control in substation under decentralized control mode of AVC[J]. Power System Technology, 2010, 35(12): 187-192(in Chinese).
- [7] 吕志鹏, 罗安, 帅智康, 等. 变电站无功电压协同优化及复合控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 50-56.
Lü Zhipeng, Luo An, Shuai Zhikang, et al. Reactive power and voltage optimized composite control for power substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 50-56(in Chinese).
- [8] 杨银国, 李扬絮, 李力, 等. 广东电网春节期间无功电压调控存在的问题与对策[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊2): 135-138.
Yang Yinguo, Li Yangxu, Li Li, et al. Analysis and countermeasures for volt/var control in guangdong power grid during the period of spring festival[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 135-138(in Chinese).
- [9] 丁心海, 黄涌, 雷军, 等. 2008年春节期间鄂豫500 kV电网电压偏高问题仿真[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 36-41.
Ding Xinhai, Huang Yong, Lei Jun, et al. Simulation on the problem of high voltage in hubei and henan provincial 500 kV power systems during 2008 spring festival[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 36-41(in Chinese).
- [10] 黄镔, 许婧, 程旻, 等. 220 kV及以下电网感性无功补偿容量初探[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 148-151.
Huang Bin, Xu Jing, Cheng Min, et al. Preliminary study on the inductive reactive compensation capacity for power grids in 220 kV and lower voltage grades[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 148-151(in Chinese).
- [11] 刘传铨, 张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 78-81.
Liu Chuanquan, Zhang Yan. Confirmation of reactive power compensation node and its optimal compensation capacity[J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 78-81(in Chinese).
- [12] Barot H, Bhattacharya K. Optimal reactive power planning and compensation effects on transmission loss components[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA: IEEE, 2007: 1-7.
- [13] Victorovna S N, Victorovich M Y, Victorovna K Y. Optimal compensation of reactive power in distribution nets as means of voltage regulation[C]//Electrical Power Quality and Utilisation. Lodz, Poland: IEEE, 2009: 1-6.
- [14] 刘一民, 李智欢, 段献忠. 进化规划方法的综合改进及其在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 47-51.
Liu Yimin, Li Zhihuan, Duan Xianzhong. Synthetic improvements of evolutionary programming method and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 47-51(in Chinese).
- [15] 张勇军, 任震. 无功电压动态控制的分布式协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 34-38.
Zhang Yongjun, Ren Zhen. Distributed cooperative optimization for reactive power/voltage dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 34-38(in Chinese).
- [16] 李勇, 张勇军, 李邦峰, 等. 基于N-1方式的无功优化规划[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 100-103.
Li Yong, Zhang Yongjun, Li Bangfeng, et al. Optimal reactive power planning by N-1 mode[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 100-103(in Chinese).



张勇军

收稿日期: 2011-06-10。

作者简介:

张勇军(1973), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统优化运行与规划、电力系统可靠性与风险评估, E-mail: zhangjun@scut.edu.cn;

刘瀚林(1987), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与规划, E-mail: liu-hanlin@qq.com;

朱心铭(1981), 男, 工程师, 主要从事电力系统运行优化控制工作。

(责任编辑 褚晓杰)