

文章编号:1671-251X(2014)10-0093-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.10.026

赵晨阳,宋墩文,温渤婴.国内工矿企业电网无功优化控制方法研究[J].工矿自动化,2014,40(10):93-97.

国内工矿企业电网无功优化控制方法研究

赵晨阳¹, 宋墩文², 温渤婴¹

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要:总结了目前国内工矿企业电网发展和研究现状,分析了企业电网中的各类无功优化设备、优化方法、常用数学模型及算法;以某典型企业为案例,分析采用禁忌搜索算法进行无功优化的方法及步骤,并进行了效益分析;最后,提出了针对工矿企业电网无功优化的发展建议。

关键词:工矿企业;电网;无功优化;禁忌搜索算法

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Research of control method of reactive power optimization for
power grid of domestic industrial and mine enterprises

ZHAO Chenyang¹, SONG Dunwen², WEN Boying¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University,

Beijing 100083, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The paper summarized current status of development and research of power grid of domestic industrial and mine enterprises, analyzed various types of reactive power optimization equipments, optimization methods, commonly used mathematical models and algorithms; Taking a typical enterprise as case analysis, analyzed approach and steps of reactive power optimization using tabu search algorithm, and conducted benefit analysis; Finally, gave development recommendations for reactive power optimization of industrial and mine enterprises.

Key words: industrial and mine enterprises; power grid; reactive power optimization; tabu search algorithm

0 引言

电力是钢铁、矿业、能源、化工、机械、冶金等基础性产业正常运转的重要保证。目前,我国电力系统负荷包括工业负荷、农业负荷、商业负荷等类型。2013年,全社会用电量为53 223亿kW·h,其中工业用电量为38 471亿kW·h,占全社会用电量的72.28%^[1],工业依然是我国用电量最大的产业,其经济性运行是社会节能减排的重要措施之一。工矿企业作为工业负荷的重要组成部分,其电力发展与企业发展有着密切的联系。现阶段,国内工矿企业

电网建设改造相对滞后于企业负荷的发展,存在着部分设备老化、线损高、耗能高、电能质量差、功率因数低等问题。通过合理的无功优化可以解决电网无功容量不足的问题,改善电能质量,延长设备寿命,提高功率因数,节约能源,使电网为企业提供更加安全、优质、可靠、经济的电能。本文在实地调研的基础上,归纳了目前国内工矿企业电网的发展现状,总结了无功优化设备、数学模型和优化算法等内容,分析了某工矿企业无功优化方法,最后提出了针对工矿企业电网的无功优化发展建议。

收稿日期:2014-01-15;修回日期:2014-08-20;责任编辑:胡娴。

作者简介:赵晨阳(1989—),男,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为工矿企业电网无功优化技术,E-mail:zcyang2013@126.com。

1 工矿企业电网发展现状

随着社会经济的发展和科学技术的进步,工矿企业对电压质量和电网稳定性的要求越来越高,企业内部逐渐形成了功能完善的输配电网络,其包含有发电机组、变电站、输电线路,同时又与地方电力系统相连。工矿企业电网具有以下特点^[2-3]:

(1) 电网规模日益复杂化,供电量大,负荷重,多为一、二类负荷,电压等级多,供电线路较短,多为辐射型网络结构。

(2) 大功率设备众多,如采掘机、抽放泵、压缩机等;启动电流大,启动频繁且时间长,多为感性负荷,同时存在着大量的非线性负荷和冲击性负荷,会产生大量谐波。

(3) 工矿企业常备有火力发电厂和备用发电机组,少部分企业备用光伏发电设施以及余热、余压等中小型发电机组。

(4) 企业内往往拥有大量精密设备,对电网的供电质量和可靠性要求很高。

(5) 企业高耗能设备众多,单台设备容量大,设备比较集中,无功优化效果显著。

目前,国内学者针对大工业用户的供电、配电过程的研究日趋全面,并取得了一定的实际成果^[4-6]。

2 无功优化设备与方法

在确保生产和设备安全运行的前提下,工矿企业常采用变压器调挡、无功补偿装置投切、自备电厂调节发电机组无功出力等方式,相互配合,调节企业电网电压和功率因数,实现无功动态平衡,并尽量减少有载调压变压器分接头和无功补偿装置的投切次数,以防止因频繁动作而引起故障。

2.1 无功优化设备

在早期的工矿企业中,无功补偿以同步调相机、同步发电机和机械式投切电容器组为主。随着电力电子技术和制造业的快速发展,相继出现了静止无功补偿器、静止同步补偿器、新型无功发生器等装置,逐步在工矿企业中得到应用。此外,一些新型的电力电子装置如有源电力滤波器、统一潮流控制器等也都具备一定的无功优化补偿功能,但由于成本较高,目前在企业中应用很少。表 1 为目前企业常用的无功补偿装置。

2.2 优化方法

高压集中补偿:在变电站集中补偿,一般连接在企业变电站 10(20/6) kV 母线上,可就地补偿变压

表 1 常用无功补偿装置

补偿装置	特点	主要应用场合
并联电容器	结构简单,技术成熟,经济,方便,损耗少,维护量小	不需要频繁操作的系统
TSC 型静止无功补偿器	投切速度快,可实现无级调节,结构复杂,需散热,损耗较大	低压电网,需快速投切的系统
TCR 型静止无功补偿器	常与电容器并联使用,精度较好,可平衡三相负荷,抑制电压波动	35 kV 及以下电网,特别是非线性化、变化迅速的电力负荷
MCR 型静止无功补偿器	无谐波,可靠性高,维护简单,调节时间长	冲击性、非线性负荷
静止无功发生器(SVG, STATCOM)	动态快速补偿,精度高,稳定性高	中低压系统,冶金、石化、矿业及电气化铁路

器的无功功率损耗,对母线电压有一定的调节作用。

高压分散补偿:即架空线路分散补偿,通过安装在杆塔上的电容器实现,一般适用于功率因数低且负载较重的长线路。

低压就地补偿:直接提供负荷所需要的无功功率,通常按配电变压器低压侧最大无功功率需求来确定安装容量,投资小,可减小变压器和线路损耗。

低压自动跟踪补偿:可跟踪负荷变化,无功随时就地平衡,动作频率高,运行安全可靠,常用于负荷变化较大的企业中。

3 无功优化数学模型与算法

3.1 数学模型

工矿企业电网属于配电网,其无功优化问题是一个多目标、多变量、多约束的混合非线性规划问题。其中常用的数学模型目标函数有系统网损、电压质量、投切费用等多种形式^[7],分别以 f_1, f_2, f_3 表示如下:

$$\min f_1 = \min \sum_{i=1}^{n_1} G_{ij} [u_i^2 + u_j^2 - 2u_i u_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \tag{1}$$

$$\min f_2 = \min \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_i - U_j^{\text{spec}}}{\Delta U_i^{\text{max}}} \right)^2 \tag{2}$$

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^m S_i \omega_i \tag{3}$$

式中: n_1 为网络总支路数; G_{ij} 为支路 $i-j$ 的电导; u_i, u_j 分别为节点 i, j 电压; δ_i, δ_j 分别为节点 i, j 相角; N 为节点数; U_j^{spec} 为节点的期望电压值,通常取

$U_j^{\text{spec}} = (U_i^{\text{max}} + U_i^{\text{min}})/2$, 其中 $U_i^{\text{max}}, U_i^{\text{min}}$ 为节点 i 的最大电压和最小电压; ΔU_i^{max} 为负荷节点 i 允许的最大电压偏差, $\Delta U_i^{\text{max}} = U_i^{\text{max}} - U_i^{\text{min}}$; m 为无功补偿装置数; S_i 为投切次数; ω_i 为投切费用。

约束条件:

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \tag{4}$$
$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \tag{5}$$
$$Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \tag{6}$$
$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \tag{7}$$
$$\cos \phi \geq c \tag{8}$$

式中: T 为变压器变比; C 为并联电容器投切容量; Q 为发电机无功出力大小; V 为节点电压; $\cos \phi$ 为功率因数; c 为功率因数最小值。

潮流平衡方程约束为

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \tag{9}$$
$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \tag{10}$$

式中: P_i, Q_i 分别为电网节点 i 注入的有功功率和无功功率; n 为节点总数; B_{ij} 为支路 $i-j$ 的电纳; δ_{ij} 为 U_i 和 U_j 之间的相角差。

由于多个目标函数中的数量级不同, 在计算的过程中, 需要进行归一化处理, 将多目标问题转化为单目标问题, 并可根据企业所侧重的安全性、稳定性和经济性等指标调整相应的权重值。常用的归一化处理方法有目标函数加权求和法、最小目标偏差法、距离函数法和模糊隶属度函数法等^[8]。

此外, 电力系统中常用的数学模型也逐步得到企业越来越多的关注, 如电力市场下的无功优化数学模型、考虑电压稳定裕度最大的数学模型、考虑分布式电源接入的无功优化模型和交直流混合电力系统优化模型等。

3.2 优化算法

无功优化算法主要可分为传统算法、智能优化算法和混合优化算法 3 大种类。无功优化的传统算法依赖于精确的数学模型和初始值, 以目标函数和约束条件的一阶或二阶导数作为寻找最优解的主要信息, 从某个初始点出发, 按照一定的轨迹不断改进当前解, 最终收敛于最优解, 数据稳定, 收敛可靠。但在处理离散数据时容易陷入局部最优, 规模大时存在“维数灾”问题, 同时存在简化近似处理, 误差较大, 其优缺点总结见表 2。

智能优化算法方便处理离散、非线性问题, 全局搜索能力强, 提高了计算速度, 但也存在容易陷入局

表 2 传统无功优化算法的优缺点

算法	优点	缺点
线性规划法	理论成熟可靠, 模型简单, 概念清楚, 计算速度快	对离散变量进行连续处理, 误差较大, 精度不高, 效率低
		搜索方向容易出错, 计算量大, 存在“维数灾”问题
非线性规划法	直观, 精度高	分两步优化, 存在发散振荡现象和“维数灾”问题
混合整数法	实现离散变量的精确处理, 结果准确	建模复杂, 计算量大, 存在“维数灾”问题
动态规划法	对目标函数和约束条件的限制相对较少, 容易寻到最优解	

部最优解、后期搜索效率不高等缺点。目前智能算法已经应用于部分工矿企业电网中, 并且取得了一定的成效。常用智能优化算法的优缺点见表 3。

针对传统算法和人工智能算法的不足, 学者们提出了混合优化算法, 即通过分析各种算法的特点, 将几种算法整合在一起, 发挥各自优势的同时弥补相互的不足, 从而得到更好的无功优化结果。混合优化算法都具有全局收敛性高、计算精度高、计算速度快等特点, 逐渐成为一种新的趋势^[9]。

4 典型工矿企业分析

以某工矿企业为例, 该企业负荷规模大, 年用电量较大, 负荷率较高, 日负荷率一般为 75%~80%; 采用三班制连续生产, 主要设备不停机, 用电负荷较平稳集中并含有冲击性负荷及高次谐波, 无功负荷较大; 平均功率因数为 0.9, 电压等级包括 220, 110, 10 kV 和 400 V; 高压线路长度为 12.7 km, 中压线路长度为 74.9 km。通过无功补偿, 使功率因数提高到 0.94。

企业在进行无功优化配置时, 首先确定补偿容量, 由无功补偿容量计算系数表查得, 功率因数由 0.90 提高到 0.94, 系数 $q_c = 0.058$ 。通过式(11)求出补偿所需总容量, 依据无功补偿柜的规范取整为 7 000 kvar。

$$Q_c = \alpha_{av} P_c q_c \tag{11}$$

式中: α_{av} 为年平均有功负荷系数, 一般取 0.7~0.75; P_c 为企业有功功率。

确定总容量后进行容量的分配, 该企业没有进

表 3 常用智能优化算法的优缺点

算法	优点	缺点
遗传算法	全局收敛性好	局部搜索能力弱,迭代次数多,计算时间长
模拟退火算法	原理简单,全局收敛性好,精度高	参数选取困难,计算时间较长,约束条件多
禁忌搜索算法	寻优速度较快,爬坡和局部搜索能力强	串行搜索效率低,收敛性依赖于初值的选择
粒子群算法	参数少,容易实现,速度快,收敛性稳定,具有记忆性	参数选择大都依靠经验,容易陷入局部最优
人工神经网络算法	收敛性较好,速度快,适合处理非线性问题,具有联想记忆性	易陷入局部最优
复合型法	计算效率高,结果可靠	计算量较大,维数高时解空间不能充分展开
专家系统法	优化效果好,节约搜索时间	建模较为复杂
混沌优化算法	全局寻优能力和较高的搜索效率	对起始点和控制函数要求很高
免疫算法	局部搜索能力强	求解效率低
差异进化算法	高效,收敛性好,鲁棒性好	搜索速度相对缓慢,容易过早收敛而陷入局部最优
模拟植物生长算法	无需编码和解码,解的稳定性高,速度快	搜索空间过大,收敛性不够
模糊算法	迭代次数少,计算时间快,智能性强	精度低,会使确定性问题复杂化
人工鱼群算法	良好的全局收敛性	临域搜索效率低
细菌群体趋药性算法	精度高,搜索效率高	离散域问题寻优能力不强
蚁群算法	较强的鲁棒性和搜索能力	适用范围不广

行过无功消耗的统计,故采用一般工矿企业的无功消耗比例来计算,即电动机、变压器、线路分别占 70%,20%,10%,因此,确定电动机等设备侧无功补偿容量按 Q_c 的 70% 计算,为 4 900 kvar。其余 2 100 kvar 用于对变压器和线路进行补偿。变压器采用高低压集中补偿的形式,根据变压器负载率的高低按其容量的 20%~40% 进行补偿;线路补偿采用分散补偿形式,拟选择电网中的 2 个节点进行补偿,以达到系统网损最小的目标。

本文采用禁忌搜索算法进行无功优化,算法步

骤如下:

- (1) 确定目标函数,即选择合理的补偿位置和容量,使网损最小。
- (2) 输入企业电网基本运行数据,设置禁忌搜索算法基本参数。
- (3) 选择初始解,并进行潮流计算,计算企业电网各节点电压和初始损耗。
- (4) 判断程序是否有新解产生:若有新的解,则需要更新当前最优解,并更新禁忌表中的内容。
- (5) 不断地移动更新当前最优解,并检查程序是否达到收敛次数,若迭代结束则输出结果共计 850 kvar。

实际进行电容器投切时,企业应根据自身的电网特性选择合理的投切方式,本例中的企业负荷比较平稳,可根据年最高负荷 P_z 将负荷分为几个区间,如 $0.2P_z, 0.5P_z, 0.8P_z$ 等,并根据所处的区间选择增加或减少投入的电容器组。通过合理安装无功补偿装置、确定简单实用的投切策略等措施,该企业电网的电能质量有了明显的提升。优化前后的部分线路电压损失和功率因数情况见表 4。

表 4 优化前后的线路电压损失和功率因数

线路序号	优化前		优化后	
	电压损失/%	功率因数	电压损失/%	功率因数
1	1.52	0.90	1.28	0.94
2	3.22	0.88	2.57	0.93
3	3.09	0.83	2.07	0.91
4	2.56	0.88	1.81	0.94
5	1.33	0.91	0.96	0.97
6	2.94	0.90	2.23	0.93

经济效益方面,企业交纳的电费主要包含基本电费、电度电费和功率因数调整电费 3 个部分。优化后减小的损耗主要为线路损耗。取优化前的平均功率因数 $\cos \varphi_1$ 为 0.90,优化后的平均功率因数 $\cos \varphi_2$ 为 0.94,线路电阻 R 约为 8.7Ω ,平均电流 I 为 1.42 A,年运行时间为 5 000 h,工业电费为 0.5 元/(kW·h),设 1 a 减少的线路损耗为 w_1 ,则

$$w_1 \mid_{\text{kW}\cdot\text{h}} = 3I^2R[1 - (\cos \varphi_1 / \cos \varphi_2)^2]t \approx 22 \tag{12}$$

由式(12)可知,1 a 减少的电费约为 11 万元。功率因数和电费关系见表 5。若功率因数由 0.90 升到 0.94,则根据表 5,相应减少电费 0.60%,约为 40 万元,每年共可节约电费 50 余万元。综

可知,无功优化对改善工矿企业电能质量和经济效益有着重要作用。

表 5 功率因数和电费关系

功率因数	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95—1.00
减少电费/%	0	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75

5 结语

电网公司应根据工矿企业的用电性质,为其制定合理的无功补偿策略和选择最优的无功补偿方案,在促进企业电网高效运行的同时,实现企业电网和公用电网的协调发展。从节能减排的角度出发,工矿企业电网还有很大的节能潜力。合理投入先进的设备,并与科学智能的优化算法相结合,是降低工矿企业损耗的有效方法。从经济效益的角度出发,企业电网通过建设无功补偿系统,可有效地改善电能质量,从而从根本上提高企业的运行水平、竞争能力和经济效益。从电网发展趋势看,越来越多的分布式电源将以微电网的性质接入到中低压配电网中,工矿企业电网应充分发挥自身分布式资源的优势,将分布式发电项目建设和无功补偿有效地结合起来,促进企业电网的优质经济运行。随着智能电网建设的不断深入,企业电网的结构将更加复杂化,运行方式也更加多样化。本文在详细分析工矿企业

电网运行特点的基础上,总结了企业电网无功优化的数学模型和求解算法,进行了案例分析,并对企业电网无功优化系统的规划设计提出了展望和建议。

参考文献:

[1] 国家能源局. 国家能源局发布 2013 年全社会用电量 [EB/OL]. (2014-01-14) [2014-03-21]. http://www.nea.gov.cn/2014-01/14/c_133043689.htm.

[2] 张昌钦. 企业级电网分析与优化研究[D]. 济南:山东大学,2008.

[3] 冯越. 大型工业企业配电网电压无功控制策略[D]. 郑州:郑州大学,2009.

[4] 蔡惠红,邱军,马爱芳. 基于遗传算法的武钢电网无功优化分析与计算[J]. 冶金动力,2010(2):8-9.

[5] 杨丽徙,丁荣刚,王西训. 工业企业配电网无功电源的两阶段优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(2):32-36.

[6] 李燕,刘忠保. 基于模型结构的企业配电网无功优化分析[J]. 电力学报,2010,25(6):470-474.

[7] 许文超,郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(1):100-104.

[8] 丘文千. 多目标电力系统无功优化及其方法[J]. 南方电网技术,2010,4(5):66-70.

[9] 单明,周步祥,胡美蓉,等. 实用的无功优化混合算法[J]. 电网技术,2006,30(增刊 1):284-287.