

结合灵敏度分析的遗传算法应用于配电网 无功补偿优化规划

余健明, 杜 刚, 姚李孝

(西安理工大学电气工程系, 陕西省 西安市 710048)

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM COMBINING SENSITIVITY ANALYSIS TO OPTIMIZED PLANNING OF REACTIVE POWER COMPENSATION FOR DISTRIBUTION NETWORKS

YU Jian-ming, DU Gang, YAO Li-xiao

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Taking the minimized sum of annual electrical energy loss and the investment for reactive power compensation equipments for objective function and considering the operating modes under various loads, in this paper a mathematical model for reactive power compensation is established. According to the feature of distribution network, i.e., numerous nodes and generous amount of calculation, to solve the presented mathematical model a method which combines genetic algorithm and sensitivity analysis is given, and the principle of compensation plan for capacitive- and inductive-reactive power is put forward.

KEY WORDS: genetic algorithm; sensitivity analysis; reactive power optimization

摘要: 以配电网全年电能损耗和无功补偿设备投资之和最小为目标, 考虑了系统不同负荷下的运行方式, 建立了无功补偿规划的数学模型。根据配电网节点多、计算量大的特点, 提出了结合灵敏度分析的遗传算法的求解方法, 提出了容性无功功率和感性无功功率的补偿规划原则。

关键词: 遗传算法; 灵敏度分析; 无功优化

中图分类号: TM727; TM761+.1 文献标识码: A

1 引言

在电力系统无功规划方面, 国内外学者已做了大量工作, 归纳起来主要有 2 个方面: 一是使规划中所建立的数学模型尽量反映实际情况, 即目标函数和多种约束条件接近电力系统运行情况, 如计及电压稳定的无功规划模型、多种运行状态的无功规划模型、考虑规划投资的模型以及长期无功规划模型等; 二是对大规模的优化规划问题求解过程中遇到的求解时间长、易产生局部最优

解和“维数灾”等问题进行改进, 出现了线形规划法、非线性规划法、基于 Bender's 分解的整数规划法、图论法、灵敏度分析、内点法和网流法以及近年来提出的模拟退火算法、遗传算法^[1]等。

在电力系统中, 无功补偿的原则是“就地补偿”, 即在配电网的末端进行补偿, 以减少无功流动引起的损耗, 但实现有困难。目前的状况是在配网高压侧(即 110 kV 或 35 kV 变电站)集中补偿居多, 中压侧分散补偿很少。因此在 10 kV 配电线路末端实施无功补偿已日益迫切。但配网中节点很多, 分布多呈辐射状, 这种多节点、多约束的无功优化规划给大规模的计算带来了困难。

为此, 本文提出了考虑电能损耗和无功补偿投资的综合目标函数, 并计及不同负荷下的运行方式, 以求获得较优的规划方案。应用结合灵敏度分析的遗传算法以求解配网无功补偿规划。

2 无功规划的数学模型

$$\min F = K_S \sum_{i=1}^{t_c} t_i P_i + K_C \sum_{i=1}^{n_c} Q_{Ci} + K_L \sum_{i=1}^{n_l} Q_{Li} + K_p \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta U_i}{U_M} \right)^2 \quad (1)$$

$$\text{式中 } \Delta U_i = \begin{cases} U_i^k - U_{i\max}^k & (U_i^k > U_{i\max}^k) \\ 0 & (U_{i\min}^k \leq U_i^k \leq U_{i\max}^k) \\ U_{i\min}^k - U_i^k & (U_i^k < U_{i\min}^k) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$U_M = U_{i\max} - U_{i\min} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

约束条件:

$$\Delta P_i^k = P_{Gi} - P_{di}^k - U_i^k \sum_{j=1}^n U_j^k (G_{ij} \cos q_{ij}^k + B_{ij} \sin q_{ij}^k) = 0$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; i \in \text{PV, PQ}) \quad (2)$$

$$\Delta Q_i^k = Q_{Gi} - Q_{di}^k + \Delta Q_{Ci} - \Delta Q_{Li} - U_i^k \sum_{j=1}^n U_j^k \cdot$$

$$(G_{ij} \sin q_{ij}^k - B_{ij} \cos q_{ij}^k) = 0$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; i \in \text{PQ}) \quad (3)$$

$$U_{i\min}^k \leq U_i^k \leq U_{i\max}^k \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$T_{i\min} \leq T_i^k \leq T_{i\max} \quad (i = 1, 2, \dots, n_t)$$

$$Q_{Li\min}^k \leq Q_{Li}^k \leq Q_{Li\max}^k \quad (i = 1, 2, \dots, n_l)$$

$$Q_{Ci\min}^k \leq Q_{Ci}^k \leq Q_{Ci\max}^k \quad (i = 1, 2, \dots, n_c)$$

式中 K_S 为系统电价; t_c 为不同负荷数; t_i 为不同负荷损耗时间; P_i 为不同负荷的系统有功网损; n_C 和 n_L 分别为电容器与电抗器补偿节点数; Q_{Ci} 和 Q_{Li} 分别为电容器和电抗器的补偿容量; K_C 和 K_L 分别为单位电容器和单位电抗器的投资系数; K_p 为电压越界惩罚因子, K_p 所乘项为电压越界惩罚项; n 为系统节点总数; n_t 为有载调压变压器个数; P_{di} 、 Q_{di} 和 U_i 分别为节点 i 注入的有功功率、无功功率和电压; $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 为节点电压的上下限; T_i 为可调变压器变比; $T_{i\max}$ 和 $T_{i\min}$ 为可调变压器变比的上下限; P_{Gi} 和 Q_{Gi} 为节点 i 注入的有功功率与无功功率; P_{di} 和 Q_{di} 为节点 i 的负荷有功功率与无功功率; 上标 k 表示对应不同负荷时的参数。

配电网结构一般是由一电源点 (根节点) 构成的辐射状网络, 线路和节点都较多, 但 PV 节点很少或没有。因此, 目标函数和约束条件中不考虑发电机节点的无功调节和罚函数项, 感性无功功率和容性无功功率的上下限的选取主要受投资和安装空间的限制。

3 无功规划数学模型求解

遗传算法是源于生物进化的自适应搜索算法, 利用解空间一群解信息, 通过选择、交叉等遗传运算, 使子代继承上一代的优良性状, 然后经过选择和适值评估, 得到更接近的问题解。尽管目前还没有通过数学严格证明遗传算法能够收敛于全局最优解, 但启迪于生物进化的算法规则具有很多优点, 故而使它广泛应用于各种优化计算。如: 它通过多点搜索代替单点搜索, 比模拟退火算法和 Tabu 搜索法更容易获得全局最优解,

因后 2 种算法是从单点出发进行搜索的, 受初始解影响较大; 它在计算时不依赖于梯度信息, 不要求目标函数连续和可导; 对待求解问题没有特别的要求, 仅根据目标函数给出的一个反映规划方案优劣程度的适应度函数即可; 它依据概率的选择规律来指导搜索的方向, 从而尽可能地避免了“维数灾”问题。但遗传算法也存在一些问题, 如初始种群有超强个体产生的“过早收敛”现象; 每一代都是种群搜索, 计算量大, 搜索时间长; 对适值函数和约束条件没有要求, 造成具体优化问题的性质没有被利用。针对这些缺点进行了改进, 但仅局限于遗传运算、收敛准则、适值函数以及惩罚函数的改进, 并未结合实际问题进行改进。文献[3]对此提出了“面向问题的遗传算法”。为此, 本文根据配电网节点多, 且多呈辐射状运行等特点, 提出了用灵敏度分析方法来确定无功补偿的地点, 应用具有动态变异率和交叉率的遗传算法来确定无功补偿的容量。

(1) 灵敏度分析

灵敏度系指以状态变量表征的系统运行状况对控制变量和扰动变量的变化的敏感性程度。对于无功规划问题, 就是要求配电网中节点无功变化对系统有功网损的灵敏度系数, 选灵敏度较高的节点作为无功补偿的候选投切点, 从而缩小了配电网无功补偿的搜索空间。灵敏度分析如下:

系统的有功网损为

$$P = \sum_{i=1}^n U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \quad (4)$$

节点无功变化对系统网损的灵敏度为

$$\partial P / \partial Q_i = (\partial P / \partial U)(\partial U / \partial Q_i) + (\partial P / \partial q)(\partial q / \partial Q_i) \quad (5)$$

式中 Q_i 、 U 和 q 分别为配网节点注入无功、节点电压幅值与相角。

欲得上式, 则须进行变换^[5], 即

$$\begin{bmatrix} \partial P / \partial U \\ \partial P / \partial q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P_i / \partial U & \partial Q_i / \partial U \\ \partial P_i / \partial q & \partial Q_i / \partial q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial P / \partial P_i \\ \partial P / \partial Q_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

于是可得

$$\begin{bmatrix} \partial P / \partial P_i \\ \partial P / \partial Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P_i / \partial U & \partial Q_i / \partial U \\ \partial P_i / \partial q & \partial Q_i / \partial q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \partial P / \partial U \\ \partial P / \partial q \end{bmatrix} \quad (7)$$

最后得出

$$[\partial P / \partial Q_i] = S_{PQ_i} \begin{bmatrix} \partial P / \partial U \\ \partial P / \partial q \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于系统中第 i 个节点, 则有

$$\partial P / \partial U_i = 2 \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \cos q_{ij} \quad (9)$$

$$\partial P / \partial q_i = -2 U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin q_{ij} \quad (10)$$

而灵敏度矩阵 S_{PQ} 中的各元素可由牛顿-拉夫逊法潮流计算中的雅可比矩阵求得。在求得各节点的灵敏度系数后, 选取每条支路灵敏度最高的 2 或 3 个节点作为无功补偿的候选位置。这样, 使无功优化规划在初始计算时就局限于补偿效益最明显的节点, 降低了计算负担和时间。但需注意的是, 灵敏度分析依赖于网络的潮流分布, 因此如果考虑负荷增长的长期规划, 则对于不同负荷都应进行灵敏度分析, 然后综合不同负荷情况来确定无功补偿规划。

(2) 遗传算法求解

计及不同负荷的运行情况一般按最大负荷、一般负荷、最小负荷 3 种方式规划。也可计及更多的运行方式, 从后文分析可知, 这样只增加计算量, 难度并未增加。规划不仅考虑容性无功补偿的投入, 对电压越限点也要考虑感性无功的增加。感性无功容量的确定原则是: 首先计算在最小负荷时的系统潮流分布, 如果有电压越限点, 那么先通过调节与该节点相连的有载调压变压器的分接头位置。若调至极限仍不满足电压要求, 则保持分接头位置, 且适当增加感性无功功率。容性无功容量的确定原则是: 以不同负荷方式下计算出的最小容性无功功率作为固定电容器的安装容量, 以计算所需最大容性无功功率与最小容性无功功率的差值作为可变电容器的安装容量。按照以上原则, 配电网无功规划优化的计算量已大为减少, 因此, 采用常规遗传算法进行求解, 即采用整实数混合编码, 遗传运算采用平均交叉、均匀变异方式, 选择采用确定性策略, 初始时选择较大的交叉率和较小的变异率, 在迭代后期则适当增大变异率并减小交叉率, 这样在迭代初始时就能保证出现较多的优秀个体, 且收敛速度快, 在迭代后期又能保证充分的新鲜个体, 增强了避免局部最优的能力。求解过程如下:

①输入系统原始数据, 进行全网潮流分析;

②进行灵敏度分析, 找出电容器和电抗器的候选位置;

③输入 GA 参数和无功补偿的节点号, 给定

终止条件, 并置迭代次数 $k = 0$;

④根据系统的不同负荷值分别进行潮流计算, 求出所有负荷下的能量损耗和无功补偿投资并作为适值函数。在最大负荷情况下, 不考虑节点负荷的递增趋势, 即不增加感性无功补偿;

⑤进行适值评估选择, 并置 $k = k + 1$, 进行遗传运算, 形成新的种群, 重复步骤⑤, 直至满足③的终止条件, 退出迭代;

⑥输出不同负荷下的无功补偿位置、容量, 系统的有功网损, 各节点电压及支路功率等。

4 算例

依照本文的模型和算法, 编制了计算软件, 并对配电网 IEEE 29 和 IEEE 30 节点进行了验算, 取得了较好的效果。本文列出了 IEEE 29 节点的验算结果。参数选取如下: $U_B = 11$ kV, $S_B = 100$ MVA; 系统运行时间以 1 年计, 最大负荷 (1.0 pu) 运行小时数为 2 000 h, 一般负荷 (0.7 pu) 运行小时数为 4 760 h, 最小负荷 (0.5 pu) 运行小时数为 2 000 h; 系统电价为 0.45 元/kWh, 电容器单组容量为 10 kvar, 价格为 20 元/kvar; 遗传算法的交叉率为 0.8, 变异率为 0.001, 迭代后期分别调整为 0.7 和 0.003; 由于验算系统为由一个根节点构成的梳状网络, 故选节点 1 作为平衡节点, 其余节点为 PQ 节点, 进行优化计算, 通过灵敏度分析, 节点 15、16、17、18、22、25 和 28 被选为补偿位置。计算结果如表 1 所示。

表 1 不同负荷下电容器的补偿容量配置
Tab. 1 Capacitor location and size in three different load operation conditions

节点	最大负荷(1.0pu)	一般负荷(0.7pu)	最小负荷(0.5pu)
	/ kvar	/ kvar	/ kvar
15	90	90	10
16	120	90	110
17	100	60	50
18	30	110	30
22	80	80	70
25	60	60	20
28	90	100	90

将表 1 中 3 种负荷水平所需的最小电容器容量作为固定电容器, 其它容量则作为可变电容器投放。补偿前系统 (空系统) 的在 3 种负荷下的网损分别为 0.0067、0.0030 和 0.0019, 补偿后分别为 0.0044、0.0019 和 0.0011。系统补偿前的年电能损耗为 141.66 万元, 补偿后年电能损失费和补偿设备投资共为 91.518 万元, 规划后节省资金

50.142 万元, 每年在电能损耗方面节约资金 51.462 万元, 1 年内便可收回无功补偿设备的投资。节点 18、28 的负荷水平为 0.7 时的补偿容量比负荷水平为 1.0 时的补偿容量还大, 这主要是由于系统在负荷水平 0.7 的运行时间较长 (4 760 h), 其对系统年电能损耗费用方面的作用更大。

无功补偿对系统的节点电压也有改善, 如表 2 所示。

表 2 系统补偿前后节点电压比较

Tab. 2 The comparison of node voltage around optimum in three different load operation conditions

节点号	补偿前 电压幅值 / pu	补偿后 电压幅值 / pu	节点号	补偿前 电压幅值 / pu	补偿后 电压幅值 / pu
2	0.976 0	0.979 5	16	0.795 9	0.834 8
3	0.951 7	0.958 7	17	0.792 9	0.832 5
4	0.938 9	0.948 0	18	0.791 8	0.831 7
5	0.930 9	0.941 4	19	0.972 0	0.976 0
6	0.901 6	0.917 3	20	0.970 9	0.975 2
7	0.883 2	0.901 9	21	0.969 5	0.974 2
8	0.874 3	0.894 4	22	0.968 4	0.974 0
9	0.859 1	0.882 1	23	0.948 5	0.955 7
10	0.840 9	0.867 7	24	0.946 7	0.954 1
11	0.830 2	0.859 0	25	0.944 8	0.952 5
12	0.825 6	0.855 3	26	0.899 7	0.916 0
13	0.813 8	0.846 4	27	0.899 0	0.915 7
14	0.805 1	0.839 8	28	0.898 7	0.915 7
15	0.799 9	0.836 3			

从表 2 可见, 补偿后节点电压得到明显提高, 系统最低点电压由 0.7918 提高至 0.8317, 无功补偿效果明显。

5 结论

本文结合配电网的特点提出了无功补偿规划的数学模型, 统一考虑了系统的全年电能损耗和补偿设备的投资, 并计及了系统的不同负荷运行

方式, 使模型能更加合理、全面地反映系统的运行情况。针对配电网节点多、计算规模大的特点, 本文提出了采用结合灵敏度分析的遗传算法来求解的方法, 并且在补偿过程中不仅考虑增设电容器, 而且考虑了在调节变压器分接头后适当增设电抗器的补偿措施。在计算中利用罚函数法处理模型的约束条件, 并应用了动态变化交叉率和变异率的搜索方式。计算结果表明, 在配电网无功补偿规划中应用本文所提方法可获得较好效果。

参考文献

- [1] 玄光男, 程润伟, 著. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 张粒子, 舒隽, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6).
- [3] 段刚, 余贻鑫. 电力系统 NP 难问题全局优化算法的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5).
- [4] Ghosh S, Das D. Method for load flow solution of radial distribution networks[J]. IEEE Proceedings-Gener Transm Distrib, 1999, 146(6): 641-648.
- [5] Grainger J J, Civanlar S. Volt/Var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part 3: the number results[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(11): 3291-3297.

收稿日期: 2001-09-07.

作者简介:

余健明 (1956-), 男, 教授, 从事配电网综合自动化和电能质量的研究工作;

杜刚 (1976-), 男, 硕士, 研究方向为配电网潮流和配电网无功优化;

姚孝孝 (1962-), 男, 在读博士研究生, 从事电力系统规划研究。

(编辑 查仁柏)

参考文献编写格式

本刊按照 CAJ-CD B/T1-1998《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范》规定的格式编排文后参考文献表。期刊类参考文献的编写格式如下:

首先, 顶格写序号, 并加方括号。其后写作者姓名, 先写姓, 后写名, 名的缩写字母之后不加缩写点。多位作者姓名之间用逗号隔开, 不要写“和”或“and”。在最后一位作者之后加句点(在中文作者之后也加句点, 而不用圈形句号)。第 4 位及以后的作者姓名可以省略, 用“等”或“et al”表示。然后写论文标题, 并加句点, 在句点之前写 J 并加方括号, 表示参考文献为期刊类。此后写期刊名, 并加逗号。刊名中可以用缩写字, 但不加缩写点。后面写出年份、卷号和期号, 例如: “2002, 26 (4)”表示 2002 年第 26 卷第 4 期。年份之后加逗号, 然后写卷号, 再把期号写在括弧里。其后用冒号, 再写文章的起止页码, 句末加句点。标题第一个词首字母大写, 后续各词字母小写。在论文中标注参考文献序号时, 请加方括号, 标注在上角位置。如果此序号为正文句子中的语法成份, 则不能排在上角位置。论文中标注参考文献序号时, 请加方括号, 标注在上角位置。如果此序号为正文句子中的语法成份, 则不能排在上角位置。

作者: 余健明, 杜刚, 姚李孝
作者单位: 西安理工大学电气工程系, 陕西省, 西安市, 710048
刊名: 电网技术 
英文刊名: POWER SYSTEM TECHNOLOGY
年, 卷(期): 2002, 26(7)
被引用次数: 35次

参考文献(5条)

1. Grainger J J; Civanlar S Volt/Var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators part 3: the number results 1985(11)
2. Ghosh S; Das D Method for load flow solution of radial distribution networks [外文期刊] 1999(06)
3. 段刚; 余贻鑫 电力系统NP难问题全局优化算法的研究 [期刊论文] - 电力系统自动化 2001(05)
4. 张粒子; 舒隽 基于遗传算法的无功规划优化 [期刊论文] - 中国电机工程学报 2000(06)
5. 玄光男; 程润伟 遗传算法与工程设计 2000

引证文献(35条)

1. 田金虎, 马超, 赵俊光, 祁玉栋 一种配电网无功源等微量补偿动态优化算法 [期刊论文] - 陕西电力 2010(1)
2. 周晓娟, 蒋炜华, 马丽丽 基于改进遗传算法的电力系统无功优化 [期刊论文] - 电力系统保护与控制 2010(7)
3. 杨丽徒, 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 [期刊论文] - 电力系统及其自动化学报 2010(2)
4. 蒋晓君 浅谈配电网无功优化补偿 [期刊论文] - 科学时代 (上半月) 2010(9)
5. 程飞, 刘俊勇, 刘莹, 朱觅, 段登伟 应对多场景运行的柔性无功规划研究 [期刊论文] - 电力系统保护与控制 2010(9)
6. 高丽萍, 王建勋, 刘会金 基于改进遗传算法的配电网无功规划优化 [期刊论文] - 电力电容器与无功补偿 2010(4)
7. 张程, 王主丁, 张宗益, 霍佳丽, 翟亮 一种规划态配网无功补偿估算方法 [期刊论文] - 电力建设 2010(11)
8. 赵俊光, 唐恒海, 江洁 确定配电网最佳无功补偿点位置及容量的优化方法 [期刊论文] - 陕西电力 2009(8)
9. 基于模糊推理和模糊多目标规划的配电网电容器优化配置 [期刊论文] - 甘肃高师学报 2009(5)
10. 黄庆, 董家读, 黄彦全 一种新的配电网无功优化算法 [期刊论文] - 陕西电力 2009(2)
11. 赵俊光, 梁科, 李洪旭 电力系统无功优化改进遗传算法的研究 [期刊论文] - 陕西电力 2009(2)
12. 董家读, 黄彦全, 李磊, 王斌晓, 宋蓬珍 基于混沌粒子群算法的配电网无功优化 [期刊论文] - 电气应用 2009(12)
13. 王承民, 段建民, 徐冉, 骆亮, 邵亮 城市电网变电站无功优化配置的数学模型及算法研究 [期刊论文] - 电气应用 2009(12)
14. 庞嘉琦 基于电网无功电压控制的遗传算法 [期刊论文] - 科园月刊 2008(3)
15. 李惠玲, 高振江, 庞占星, 盛万兴, 孟晓丽 基于全网无功优化的配电网无功优化系统的设计 [期刊论文] - 继电器 2008(10)
16. 陈延秋, 张尧, 魏映华, 胡金磊 改进遗传算法结合灵敏度分析的无功优化 [期刊论文] - 电气应用 2008(7)
17. 乔蕾, 郭力, 张尧, 胡金磊 基于最优潮流的分布式小水电无功考核方法 [期刊论文] - 电力系统及其自动化学报 2008(2)
18. 邓阳, 吴政球, 容文光, 匡文凯 基于泰勒级数的N-1网络快速灵敏度修正计算 [期刊论文] - 继电器 2007(16)
19. 杜雄, 周维维, 林国梁 采用虚拟电阻的电力电容器保护法 [期刊论文] - 电网技术 2007(10)
20. 丁晓群, 王宽, 沈茂亚, 王仲达, 周振凯, 邱婕 结合模态分析的遗传算法在配电网无功规划中的应用 [期刊论文] - 电网技术 2006(17)
21. 成立, 闫巍, 王振宇, 张兵, 施卫东, 刘合祥 基于改进型遗传算法的农电网无功优化规划研究 [期刊论文] - 农业工程学报 2006(4)
22. 胡彩娥, 杨仁刚 考虑电压稳定的电力系统无功优化规划 [期刊论文] - 继电器 2005(4)
23. 郭卉 改进遗传算法在牵引变压器优化设计中的应用 [期刊论文] - 中国电机工程学报 2005(4)
24. 施蔚锦 地区电网无功电压优化控制系统 [期刊论文] - 能源与环境 2005(1)
25. 施蔚锦 基于遗传算法和专家系统的地区电网无功电压优化控制系统 [期刊论文] - 福建电力与电工 2005(1)
26. 王晓凤 结合遗传算法的配电网无功补偿 [学位论文] 硕士 2005
27. 胡海燕 配电网低压侧自动无功补偿装置安装位置的优化规划 [学位论文] 硕士 2005
28. 汪海涌 基于遗传算法的电力系统无功优化的研究 [学位论文] 硕士 2005
29. 徐郑 配电网无功规划的研究 [学位论文] 硕士 2005

30. [舒立平](#), [陈允平](#) 一种新的无功电力定价算法[期刊论文]-[电网技术](#) 2004(5)
31. [余健明](#), [张栋](#), [姚李孝](#) 基于一种新待补偿点定位法的配电网络无功优化[期刊论文]-[电网技术](#) 2004(1)
32. [胡彩娥](#) 考虑静态电压稳定裕度的多目标电压-无功规划[学位论文]博士 2004
33. [黄晓彤](#) 配电网无功补偿优化的研究[学位论文]硕士 2004
34. [舒立平](#) 市场环境下电网安全运行策略及输电模型的研究[学位论文]博士 2004
35. [王建强](#) 智能型配电网无功补偿系统[期刊论文]-[电网技术](#) 2003(7)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dwjs200207011.aspx