



**Research on High Reliability Divided-Period Reactive
Power Optimization in Regional Power System**

By

LI Mei

Under the Supervision of

Prof. CHENG Xin-gong

A Thesis Submitted to the University of Jinan

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Engineering

University of Jinan

Jinan, Shandong, P. R. China

May , 2011



原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律责任由本人承担。

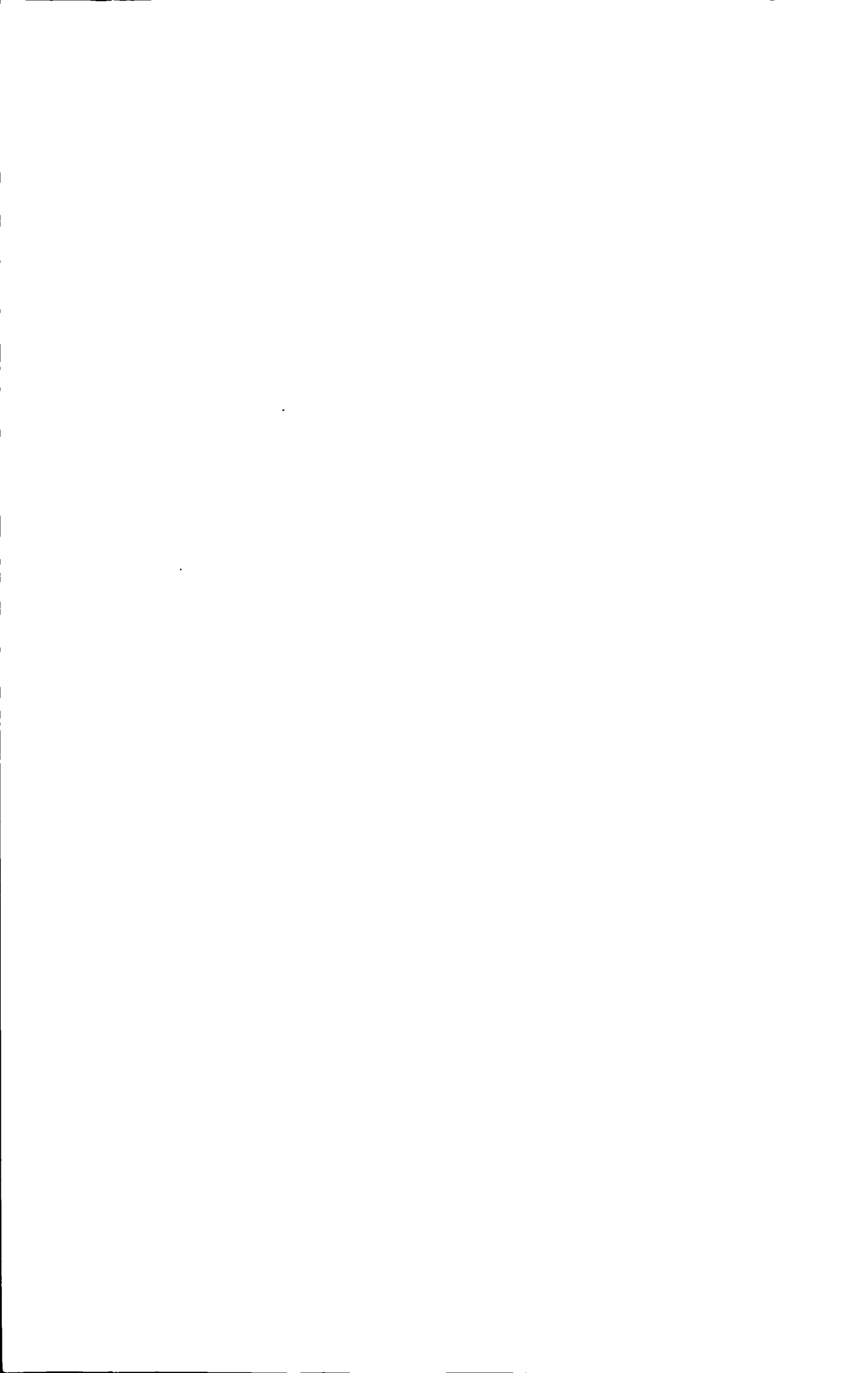
论文作者签名： 李美 日期： 2011年5月31日

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解济南大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借鉴；本人授权济南大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

公开 保密（ 年，解密后应遵守此规定）

论文作者签名： 李美 导师签名： 程新功 日期： 2011年5月31日



目 录

摘 要	V
ABSTRACT	VII
第一章 绪 论	1
1.1 选题的背景和意义	1
1.2 问题提出	2
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 电力系统无功优化研究现状	2
1.3.2 先导节点现有选择方法	3
1.3.3 传统无功优化解决方法	4
1.4 本文所做的主要工作	6
1.5 本章小结	6
第二章 无功优化数学模型及其算法	7
2.1 “集中优化”数学模型	7
2.1.1 系统的潮流等式约束方程	7
2.1.2 变量的不等式约束方程	8
2.1.3 目标函数	8
2.2 “集中优化”算法——牛顿法	9
2.2.1 牛顿法的基本思想	9
2.2.2 牛顿法在“集中优化”中的应用	10
2.3 无功优化过程中存在问题	15
2.4 先导节点定义与选择	16
2.4.1 先导节点定义	16
2.4.2 潮流灵敏度矩阵	16
2.4.3 潮流灵敏度矩阵求解先导节点	18
2.5 本章小结	21

第三章 基于负荷多重分形特征参量变时段方法	23
3.1 分形理论概述	23
3.1.1 分形概念	23
3.1.2 分形的特征	23
3.2 电力负荷分形特征研究	24
3.2.1 分形时间序列的特征量	24
3.2.2 R/S 分析法及其具体步骤	26
3.2.3 电力负荷分形特征的验证结果	27
3.2.4 V 统计量计算方法	28
3.3 电力负荷多重分形特征研究	29
3.3.1 多重分形特征参量计算方法与意义	29
3.3.2 电力负荷多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 计算步骤	32
3.3.3 电力负荷多重分形特征的验证结果	33
3.4 基于负荷多重分形特征参量变时段方法思想	34
3.5 谱系聚类算法	35
3.6 基于负荷多重分形特征参量变时段方法流程图	36
3.7 基于负荷多重分形特征参量变时段方法的仿真及结果分析	37
3.7.1 仿真所用负荷数据	37
3.7.2 基于负荷多重分形特征参量变时段方法分时段仿真结果及分析	38
3.8 本章小结	41
第四章 高可靠性变时段区域电网无功优化技术实际应用	43
4.1 POWER CL 无功优化系统	43
4.1.1 系统结构	43
4.1.2 工作流程	44
4.1.3 离线优化模式	45
4.1.4 在线优化模式	47
4.2 POWER CL 无功优化系统在某供电公司的运行情况	48
4.2.1 优化前电网状况	48

4.2.2 改造方案.....	49
4.2.3 安装本系统后对电网的改善.....	53
4.3 本章小结.....	53
第五章 结论与展望.....	55
5.1 结论.....	55
5.2 展望.....	56
参考文献	57
致 谢.....	61
附 录.....	63
一、在校期间发表的学术论文.....	63
二、在校期间参加的项目.....	63
三、在校期间获奖情况.....	63

摘 要

在电力系统实际运行优化中,在线负荷是不断波动的,为了保持系统处于最优状态,需要在理论上实时不断地进行动态的无功优化。所谓无功优化,就是通过有载调压变压器分接头、无功补偿装置和发电机无功出力的调度,实现电网无功的合理分配,达到提高电压质量和降低网损的目的。

实际无功优化过程中需要解决两大问题:第一,如何确定优化时刻。传统方法通常选择每天 24 个时刻中各个时刻作为固定的优化时刻,由于实际负荷是随时间变化的,在有的时间段,负荷波动幅值小,持续时间段,在这样的时间段内进行优化控制,会造成变压器、电容器等补偿设备的频繁动作,减少了补偿设备的使用寿命;在有的时间段,负荷波动较剧烈且持续时间较长,如果不及时进行优化,会使控制效果滞后,甚至产生相反的效果。因此,选择一个合理的优化时刻确定方法对减少补偿设备的频繁动作起着关键作用。第二,依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻。在实际电网中包含多个节点,依据每个节点的负荷变化情况,分别确定各个节点的优化时刻,由于各个节点负荷变化情况不同,容易造成各个节点的优化时刻的不同。因此,需要确定一个能够反映全网电压水平的节点,依据该节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻。为了解决这两大问题,本论文提出了一种高可靠性变时段区域电网无功优化方法。

第一,针对如何确定优化时刻的问题,本论文提出了基于负荷多重分形特征参量的变时段方法。负荷的变化每天都比较近似,但又不是周期性的变化,这种情况符合非线性动力学中的分形理论,以每天补偿设备的最大动作次数为目标,将一天 24 个时刻中多重分形特征参量类似的时段进行合并,从而得到合理的补偿时段,只在每个补偿时段进行一次优化,该方法大大减少了变压器或无功补偿装置的动作次数。

第二,针对依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网优化时刻的问题,本论文提出了依据电网中先导节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻,先导节点能够代表全网的电压水平,与电网中其它节点有着密切的关系。

本文所做的主要工作包括:

首先,选取先导节点作为确定分时段所依据的负荷变化节点。本论文采用潮

流灵敏度矩阵选择电网中先导节点,该方法能很好地解决优化过程中各个节点的优化时刻无法实现相互协调的问题。

其次,如何确定优化时刻来减少变压器和无功补偿装置动作次数的问题,提出创新的基于负荷多重分形特征参量变时段方法。应用分形理论,计算一天 24 个不同时刻的多重分形特征参量。以每天补偿设备的最大动作次数为目标,利用谱系聚类算法,合并多重分形特征参量类似的相邻时段,形成合理的补偿时段,只在每个补偿时段进行一次优化,达到减少补偿设备动作次数的目的。

最后,进行仿真和实际应用。编写分时段算法程序,并进行仿真,调试。通过对分时段所得到的分段结果进行分析,验证了基于多重分形特征参量变时段方法的有效性;通过将本论文所提出的选择先导节点方法和变时段方法应用到实际电网优化中,进一步证明本论文所提出的高可靠性变时段区域电网无功优化方法很好解决了无功优化中存在的问题。

关键词: 区域电网; 无功优化; 先导节点; 变时段; 多重分形;

ABSTRACT

In practice, since on-line load is constantly fluctuating, the reactive power optimization is needed to be conducted constantly in theory in order to keep optimal state of the power system. By regulating the taps of transformers, the reactive power compensators and controlling reactive power of the generator, reactive power optimization is to distribute reactive power reasonably to improve the quality of voltage and decrease the losses of network.

In the process of reactive power optimization, there are two problems needed to be solved: the first problem is that how to determine the time of reactive power optimization. The traditional method chooses each time of the daily 24 times as the fixed time of reactive power optimization. Because of the daily power load data at the different times are unfix, the traditional method easy to cause the frequent operation of compensation devices at the time when the reactive power needed not to be optimized, thus the traditional method easy to reduce the number of switching operations of compensation devices. Choosing a reasonable method to determine the time of reactive power optimization plays a key role in reducing the number of switching operations of compensation devices. The second problem is that which node should be chosen to determine the time of reactive power optimization. In the power system, Because of the power load data in different nodes are difference, the time of reactive power optimization of each node is different, thus choosing a node which can reflect the voltage level of network to determine the time of reactive power optimization.

The divided-period method based on multi-fractal characteristic parameters was proposed to determine the time of reactive power optimization. The daily power load data at the same time are not identical or periodic, but the tendencies of the daily power load are similar. So this situation accords with the fractal theory in nonlinear dynamics. Considering the maximum allowable daily number of switching operations of compensation devices, the compensation times are classified adaptively through

clustering 24 different times which have the similar multi-fractal characteristic parameter in one day. This method which conducted reactive power optimization in every compensation time greatly reduces the number of switching operations of compensation devices.

The method of selecting the pilot node to determine the time of reactive power optimization was proposed. The pilot node can reflect the voltage level of network and have a close relationship with other nodes.

The main works in this paper includes three parts:

First, we select the pilot node using sensitivity matrix, this method well achieve the coordination between every time of reactive power optimization of each node.

Second, the divided-period method based on multi-fractal characteristic parameters was proposed to determine the time of reactive power optimization to reduce the number of switching operations of compensation devices. Using the fractal theory, considering the maximum allowable daily number of switching operations of compensation devices, the compensation times are classified adaptively using hierarchical clustering method through clustering 24 different times which had the similar multi-fractal characteristic parameter in one day, this method which conducted reactive power optimization in every compensation time greatly reduces the number of switching operations of compensation devices.

Finally, we wrote the program of the divided-period method to carry out the simulation and debugging. Through analyzing the classification result, we proved that the divided-period method based on multi-fractal characteristic parameters proposed in this paper is effective. The methods are further proved effective by putting them into application.

Key Words: regional power system; reactive power optimization; pilot node; divided-period; multi-fractal

第一章 绪 论

1.1 选题的背景和意义

电压质量是电力系统电能质量的重要指标之一，在诸多电能质量问题中，电压波动过大造成的危害最为广泛：不但直接影响电气设备的性能，还将给系统的稳定、安全运行带来困难，甚至引起系统电压崩溃，造成大面积停电。无功优化不仅可以优化电网的无功潮流分布，维持电压水平，提高电力系统运行的稳定性，而且可以降低有功网损和无功网损，从而改善电压质量，使用电设备安全可靠地运行。因此，无功优化的重要性已得到了全球的关注，很多国家都对此给予了足够的重视。

区域电网无功优化控制是从电网的角度对电压和无功进行综合控制，从而达到了改善各节点电压质量及降低网损的目的。

电力系统无功优化研究比较成熟的是静态无功优化问题，静态无功优化是针对某一确定负荷断面进行的，但实际负荷是随时间变化的，要应用于实际电网的无功优化控制，必须在时间尺度上对无功优化问题进行动态的研究，即必须开展变时段无功优化的研究。采用变时段无功优化控制方案，在以最少补偿设备调节次数的前提下，在每天无功变化速度快时提高无功电压调节频率，而在无功变化慢时降低调节频率。达到既减少补偿设备动作次数，又提高补偿效率的目的。

目前绝大多数使用无功补偿装置自动调节的变电站，变压器日动作次数在 8~20 次之间，而电容器组日动作次数在 10~30 次之间。变压器和电容器组的频繁动作会大大降低设备的使用寿命，缩短维护周期，进而给电力生产带来更大的损失和社会负面效应。因此，提高系统的可靠性、降低补偿设备动作次数，进一步降低网损已经成为变时段无功优化需要解决的重要问题。

高可靠性变时段区域电网无功优化技术在提高电能质量方面有着举足轻重的作用，对提高电力系统供电的安全性、经济性和可靠性，保证用电设备的正常运行，都有着十分重要的意义，因此，有很高的使用价值和广阔的市场前景。

1.2 问题提出

在电力系统实际运行优化中,在线负荷是不断波动的,为了保持系统处于最优状态,需要在理论上实时不断地进行动态的无功优化。所谓无功优化,就是通过对有载调压变压器分接头、无功补偿装置和发电机无功出力的调度,实现电网无功的合理分配,达到提高电压质量和降低线损的目的。实际无功优化过程中需要解决两大问题:第一,如何确定优化时刻。传统方法通常选择每天 24 个时刻中各个时刻作为固定的优化时刻,由于实际负荷是随时间变化的,每天不同时刻的负荷变化情况并不固定,在有的时间段,负荷波动幅值小,而在有的时间段,负荷波动幅值较大,所以,传统方法容易造成变压器或无功补偿装置的频繁动作,减少了补偿设备的使用寿命。因此,选择一个合理的优化时刻确定方法对减少补偿设备的频繁动作起着关键作用。第二,依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻。在电网中,由于每个节点的负荷变化情况不同,每个节点的补偿时刻不同,从而造成优化过程中各个节点的优化时刻无法实现相互协调。因此,需要确定一个能够反映全网电压水平的节点,依据该节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻。

采用变时段无功优化方法,以每天补偿设备的最大动作次数为目标,得到合理的优化时刻,即补偿时段,只对每个补偿时段进行一次优化,该方法能大大减少变压器和无功补偿装置的动作次数,解决无功优化过程中出现的第一个问题。

在电力系统中,先导节点具有较好的鲁棒性,它的电压水平能充分反映全网的电压水平。当系统电压扰动时,通过一定措施使得先导节点的电压能够恢复到以前的水平,则全网中各个节点的电压偏差最小。因此,一个好的先导节点选择方法能够解决无功优化过程中出现的第二个问题。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 电力系统无功优化研究现状

电力系统无功优化问题是从最优潮流的发展中分化出的一个分支问题^[1,2],是一个多变量、多约束的混合非线性规划问题,其控制变量既有连续变量(发电机的电压和无功出力),又有离散变量(有载调压器分接头档位、补偿电容器、电

抗器的投切组数),使得无功优化过程十分复杂。

近年来,国内外学者们对电力系统无功优化进行了大量研究,并且取得了一定的成绩。但是,由于约束条件的非线性以及无功优化目标函数等反面的特点,目前为止,现有的无功优化方法仍未能很好的解决这些问题。

就电力系统无功优化的算法而言,算法可以分为两大类:常规优化方法和人工智能方法。常规优化方法^[3,4]主要包括:线性规划法、非线性规划法、混合整数规划法、二次规划法以及动态规划法等。人工智能方法^[5-39]主要包括:人工神经网络法、专家系统、模糊优化法以及启发式搜索算法等。模拟退火算法、遗传算法以及 Tabu 搜索等方法已经在电力系统无功优化应用中取得了大量的成果。

就无功优化控制而言,学者们习惯把局部补偿和区域补偿分开来,形成两种不同的补偿方法。对于局部补偿,往往采用就地无功平衡策略。对于区域补偿,往往采用以调度主站作为中心的全网优化策略。上述两种方法均存在一系列需要解决的问题,就地无功平衡策略只能对单个变电站进行无功电压的综合自动控制,无法对全网进行综合自动控制,系统一旦遇到稳定性问题时,该策略不能依据系统的运行方式及时调整控制策略从而使系统恢复稳定;全网优化策略是以调度主站为中心,采用集中式算法,通讯量比较大,优化速度较低,因而不能实现实时控制。因此,上述两种方法均不是合理有效的无功优化控制策略。为了解决就地平衡与全局优化之间的矛盾,寻找一种合理的无功优化控制策略成为了迫切需要解决的问题。

1.3.2 先导节点现有选择方法

当电力系统受到某种情况的扰动时,通过调节系统中的无功源使得某些节点的电压偏差为零,从而使得全网中各个节点的电压偏差最小,这些节点就被称为先导节点。先导节点的电压水平能充分反映全网的电压水平。通过先导节点的定义可以看出,先导节点在全网各个节点中的重要性,因此确定一个好的先导节点选择方法是比较关键的。

先导节点的选择是一个复杂的求解过程,国内外学者为此多年来一直致力于先导节点选择方法的研究。

(1) 贪婪算法

贪婪算法就是从系统全部节点中搜索出一个节点,如果该节点使得系统中各个节点的电压偏差最小,该节点就被选定为先导节点^[40]。该算法的优点就是不需要初始解就可以求解出一个解,缺点就是在求解过程中极易陷入局部的最大或最小。

(2) 模拟退火算法

模拟退火算法是要首先设定一个初始值作为候选先导节点,在系统全部节点中进行搜索,如果有一个新的值能够使得系统中各个节点的电压偏差最小,那么该值所对应的节点被选定为新的先导节点,重新继续搜索,直到搜索结束。

该算法的优点就是选择得到的先导节点质量高,通用,容易实现,缺点是算法的优化过程较长。

(3) 全局搜索算法

全局搜索算法要首先设定一个初始值作为候选先导节点^[40],在系统全部节点中搜索出所有可能的先导节点的集合,把能够使得系统中各个节点的电压偏差最小的节点选定为先导节点。

该算法的优点就是对初始值要求不高,求解过程中不会陷入局部的最大或最小,缺点就是搜索速度较慢,计算时间较长。

(4) 局部搜索算法

局部搜索算法首先也要设定一个初始值作为候选先导节点,然后将系统剩余全部节点中的一个节点代替候选先导节点,如果该节点能够使得系统中各个节点的电压偏差减少,那么就选择该节点作为新的候选先导节点,重新继续搜索,直到搜索结束。

该算法的优点就是效率较高,缺点就是求得的先导节点的鲁棒性较差。

1.3.3 传统无功优化解决方法

在系统实际的运行中,绝大多数变电站都使用无功补偿装置的自动调节,变电站无功补偿控制装置品种较多但不论在技术上还是使用年限上均普遍老化,缺乏与现代电力系统相适应的、满足高通讯要求、高可靠性、高适应性、有利于一次设备运行的补偿手段。山东电网作为国内发展最快的电网之一,仅有不足 20% 的地调和县调安装了无功优化软件,而由于软件性能、可靠性等问题,实际使用

率更不足 10%。60%的变电站没有无功补偿装置，而其余 40%安装无功补偿装置的变电站中，有一半的 VQC 处于闲置状态，其闲置原因大多是因为 VQC 造成了一次补偿设备的频繁动作。

目前，传统的解决方式主要有以下几种方式：

(1) 单纯限制每天的动作次数的方式，在达到一定次数时不再动作，极有可能错过了最需要动作的时段。

(2) 定时段预测方式，将每天按小时划分为 24 时段，在每个时段进行一次优化控制。负荷的变化不是在各个时段均匀发生的，如在上、下班时间内负荷变化较快，而在午夜负荷变化较慢。所以定时段的划分不十分科学。

(3) 极少数采用通过对前一天的历史数据进行数值预测，从而划分第二天的补偿时段的方式，该方式为变时段方式。即将前一天中负荷变化的统计数据接近的时段合并成一个时段，从而减小动作次数。

文献[41]提出了一种考虑设备一天内调节次数限制的分时段算法，该算法保证了分段的有效性和可操作性，结合双种群粒子群算法对每个时段进行静态无功优化，降低了网损和设备动作次数。

文献[42-43]针对电力系统变时段无功优化问题，提出了一种基于无功调节设备一天内最大动作次数的启发式迭代算法，从而可以根据负荷变化的趋势得到无功控制设备动作的时间点，应用单一负荷下的静态无功优化研究成果，该方法不仅可以明显降低网损，而且可以简化无功优化控制的操作。

但是由于电网负荷变化的随机性，前一天的负荷变化情况并不能完全反映第二天的负荷变化情况，比如第二天的负荷上升时间并不一定就是前一天的负荷上升时间，因此，现有变时段方法没有依据当天负荷实际变化情况进行分时段。

文献[44]利用分形理论揭示了电力系统负荷具有分形特性，充分体现了负荷的时间尺度和空间尺度的自相似特点，该方法是一种新的负荷分析方法，对电力系统负荷预测具有一定指导意义。文献[45]根据分形原理，利用分形插值方法实现了电力负荷的预测，具有较好的实用价值。文献[46]运用分形理论和 R/S 方法构造了电力负荷分析模型，证实了电力负荷时间序列具有分形特征，为电力负荷特性的研究提供了一个新的角度。文献[47]验证了分形理论应用于负荷预测的可行性和合理性，为将分形原理应用于电力系统负荷预测提供了理论基础，并且为

动态无功优化提供了理论基础。文献[48]根据当前负荷预测技术应用现状和项目实际应用需要,结合分形理论,对短期负荷预测算法进行了深入的研究,为变时段无功优化提供了理论基础。文献[44-48]所提到的分形理论,为本论文寻找更好更新的变时段方法提供了思想。

1.4 本文所做的主要工作

本文的主要工作包括:

(1) 选取先导节点作为确定分时段所依据的负荷变化节点,本论文采用潮流灵敏度矩阵选择电网中先导节点,解决了优化过程中各个节点的优化时刻无法实现相互协调的问题。

(2) 针对如何确定优化时刻来减少变压器和无功补偿装置动作次数的问题,提出基于负荷多重分形特征参量变时段方法。应用分形理论,计算一天 24 个不同时刻的多重分形特征参量。以每天补偿设备的最大动作次数为目标,利用谱系聚类算法,合并多重分形特征参量类似的相邻时段,形成合理的补偿时段,只在每个补偿时段进行一次优化,达到减少补偿设备动作次数的目的。

(3) 仿真和实际应用。以 MATLAB 为工具,编写分时段算法程序,并进行仿真,调试。通过对分时段所得到的分段结果进行分析,验证了基于多重分形特征参量变时段方法的有效性;通过将本论文所提出的选择先导节点方法和变时段方法应用到实际电网优化中,进一步证明本论文所提出的高可靠性变时段区域电网无功优化方法很好地解决了无功优化中存在的问题。

1.5 本章小结

本章首先介绍了选题的背景和意义;对电力系统无功优化的研究现状、现有先导节点的选择方法、传统无功优化解决方法作了深入阐述;针对无功优化过程中存在的如何确定优化时刻和依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网优化时刻的问题,本论文提出了采用先导节点和分形理论解决无功优化过程中出现的问题;最后归纳提出了本文所做的主要工作。

第二章 无功优化数学模型及其算法

所谓无功优化就是指依据合适的方法,使得变压器的分接头、无功补偿装置以及发电机机端的电压之间相互配合,从而使得网损降低及各个节点的电压保证在规定范围之内。

2.1 “集中优化”数学模型

针对现有无功优化控制系统存在的缺陷,本论文在进行无功优化时采用的是“集中优化”方式,所谓集中优化就是指:区域电网电压无功优化计算程序,利用数据采集与监视控制系统获得的实时数据,依据算法库中的算法进行在线无功优化,从而得出区域电网无功优化的控制策略,给出合理的变压器分接头以及电容器投切控制策略,并将该控制策略以定值的方式下发给 VQC,从而达到提高系统电压合格率、降低全网网损和提高系统可靠性的目的。

“集中优化”的数学模型一般包括:潮流等式约束方程、变量的不等式约束方程以及目标函数。

2.1.1 系统的潮流等式约束方程

在系统无功优化过程中,当对变压器的分接头、无功补偿装置以及发电机机端的电压进行相互调节的时候,系统的各个节点运行的变量必须满足式(2.1)、式(2.2)的潮流等式约束方程:

$$P_{gi} - P_{di} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2.1)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (2.2)$$

在式(2.1)、式(2.2)中, P_{gi} 、 Q_{gi} 分别为第 i 个节点的发电机的有功功率、无功功率; P_{di} 、 Q_{di} 分别为第 i 个节点的负荷的有功功率、无功功率; U_i 为第 i 个节点的电压的幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为第 i 、 j 个节点的导纳矩阵的实部、虚部; θ_{ij} 为第 i 、 j 个节点的电压相角之差; n 为系统节点的总数。

2.1.2 变量的不等式约束方程

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (2.3)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (2.4)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \quad (2.5)$$

$$|S_{ij}^f(\theta, U)| - S_{ij}^{\max} \leq 0 \quad (2.6)$$

$$|S_{ij}^t(\theta, U)| - S_{ij}^{\max} \leq 0 \quad (2.7)$$

在式(2.3)、式(2.4)、式(2.5)、式(2.6)、式(2.7)中, U_i^{\min} 、 U_i^{\max} 分别为母线电压的上限、下限; P_i^{\min} 、 P_i^{\max} 分别为发电机有功功率上限、下限; Q_i^{\min} 、 Q_i^{\max} 分别为发电机无功功率上限、下限; $S_{ij}^f(\theta, U)$ 、 $S_{ij}^t(\theta, U)$ 分别为线路首端、末端传输视在功率。

2.1.3 目标函数

在无功优化中, 一般是以有功功率损耗最小为目标函数。目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^n P_{gi} \quad (2.8)$$

假如定义 $x = [\theta \ U \ P_g \ Q_g]^T$, 则上述问题的简化模型精确表示如下:

$$\min f(x) \quad (2.9)$$

$$\text{功率平衡约束: } g_1(x) = 0 \quad (2.10)$$

$$\text{支路潮流约束: } g_2(x) = 0 \quad (2.11)$$

$$\text{变量不等式约束: } x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (2.12)$$

2.2 “集中优化”算法——牛顿法

2.2.1 牛顿法的基本思想

在数学方面,牛顿法是用来求解非线性代数方程式的方法。该方法的基本思想是:将非线性方程组转变成相应的线性方程组,利用由目标函数的二阶导数组成的海森矩阵以及由网络潮流方程的一阶导数组成的雅可比矩阵,反复对其生成的相应的线性方程组进行求解的过程,即逐次线性化迭代求解的过程^[49]。该方法的基本原理分析如下:

设式(2.13)给出的非线性代数方程组:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_2 \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= b_n \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

在式(2.13)中: $x_i, i=1, 2, \dots, n$ 是变量; $b_j, j=1, 2, \dots, n$ 是常数。

设非线性方程组的近似解是 $x_i^{(0)}, i=1, 2, \dots, n$, 设 $x_i^{(0)}$ 与其准确解之间的偏差定义为 $\Delta x_i, i=1, 2, \dots, n$, 将 $x_i^{(0)}$ 与 Δx_i 代入式(2.13)中可得:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= b_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= b_2 \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= b_n \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

将式(2.14)在 $x_i^{(0)}, i=1, 2, \dots, n$ 展开成泰勒级数,以其中任意的一个方程式 j 为例:

$$\begin{aligned} & f_j(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) \\ &= f_j(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_j}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n + \dots \quad (2.15) \\ &= b_j \end{aligned}$$

其中, $\frac{\partial f_j}{\partial x_i} \Big|_0$ 是函数 $f_j, j=1, 2, \dots, n$ 在 $x_i^{(0)}, i=1, 2, \dots, n$ 处对 x_i 的偏导数的

值。略去二阶以及二阶以上的高阶项,便得到式(2.16)的线性方程组:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n + \dots &= b_1 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n + \dots &= b_2 \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n + \dots &= b_n \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

式(2.16)称之为牛顿法的修正方程式组，写简化为矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \dots\dots\dots \\ b_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

式(2.17)可以简写为：

$$\Delta f = J \Delta x \quad (2.18)$$

其中， J 为雅可比矩阵。

牛顿法求解非线性方程组的具体步骤如下：

- (1) 设定一组初始值 $x_i^{(k)}, i=1, 2, \dots, n$ 。
- (2) 将设定的初始值 $x_i^{(k)}, i=1, 2, \dots, n$ 代入到式(2.17)中，计算得到 Δf 、 J 的各个元素值。
- (3) 通过式(2.18)求解得到 $\Delta x_i^{(k)}, i=1, 2, \dots, n$ 。
- (4) 求解出修正后的 $x_i^{(k+1)}$ 值， $x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)}, i=1, 2, \dots, n$ 。
- (5) 将 $x_i^{(k+1)}$ 代入到式(2.18)中反复进行迭代，进行逐次线性化迭代求解，直到得到式(2.13)的最准确解。

2.2.2 牛顿法在“集中优化”中的应用

通过牛顿法的基本思想可以看出，应用牛顿法进行“集中优化”时是将电网中的功率方程组转变成相应的线性方程组，由网络潮流方程的一阶导数组成的雅可比矩阵反复对其生成的相应的线性方程组进行逐次线性化迭代求解的过程。下

面将首先介绍电网中如何由节点导纳矩阵推导出“集中优化”所用的功率方程，然后介绍如何求解功率方程的修正方程，最后总结出牛顿法进行“集中优化”的具体步骤。

对于一个具有 n 个独立节点的网络系统，可列写出 n 个节点的方程，该方程的矩阵形式可以写为：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \vdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

式(2.19)可以简写为：

$$I = YU \quad (2.20)$$

其中，矩阵 Y 被称为节点导纳矩阵。

在式(2.19)中对角线元素 Y_{ii} 为第 i 个节点的自导纳，它的值等于所有接于第 i 个节点的支路导纳之和。自导纳 Y_{ii} 的物理意义为：当网络中(除第 i 个节点以外)所有的节点接地时，从第 i 个节点注入到网络中的电流与施加于第 i 个节点的电压之比，即：

$$Y_{ii} = \dot{I}_i / \dot{U}_i (\dot{U}_j = 0, j \neq i) \quad (2.21)$$

其中， $i=1,2,\dots,n$ ， $j=1,2,\dots,n$ 。

在式(2.19)中非对角线元素 Y_{ij} 被称为第 i 、 j 个节点之间的互导纳，大小等于直接连接于第 i 、 j 个节点之间的支路导纳的负值。互导纳 Y_{ij} 的物理意义为：当网络中(除第 j 个节点以外)所有的节点接地时，从第 i 个节点注入到网络中的电流与施加于第 j 个节点的电压之比，即：

$$Y_{ij} = \dot{I}_i / \dot{U}_j (\dot{U}_i = 0, j \neq i) \quad (2.22)$$

如果第 i 、 j 个节点之间不存在直接的支路，那么 $Y_{ij}=0$ ，因此节点导纳矩阵是一个对称稀疏矩阵。

在实际电网中，已知量都是各个节点的注入功率，而不是各个节点的注入电

流^[60]，因此，式(2.19)中的注入电流必须用节点的注入功率来表示。节点的注入功率与节点的注入电流之间的关系式为： $i_i = S_i / \dot{U}_i = \frac{P_i + jQ_i}{\dot{U}_i}$ ，将其代入式(2.19)

中得到式(2.23)：

$$\frac{P_i + jQ_i}{\dot{U}_i} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad (2.23)$$

式(2.23)就被称作电力系统进行无功优化计算的功率方程。

采用直角坐标形式，将 $\dot{U}_i = e_i + jf_i$ ， $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ 代入式(2.23)中，得到式(2.24)：

$$\left. \begin{aligned} P_i &= e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i &= f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

设 n 个节点中： m 个PQ节点、一个平衡节点、 $n-m-1$ 个PV节点。式(2.24)可以改写为式(2.25)：

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_i &= P_i - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ \Delta Q_i &= Q_i - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ \Delta U_i^2 &= U_i^2 - (e_i^2 + f_i^2) \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

将式(2.25)按泰勒级数进行展开，略去 $\Delta e_i, \Delta f_i$ 二次方程以及以后的各项，便可得到式(2.26)所示的修正方程：

$$\Delta W = J \Delta U \quad (2.26)$$

在上式中: $\Delta W = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{m+1} \\ \Delta U^2_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \Delta U^2_{n-1} \end{bmatrix}$ 、 $\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta e_m \\ \Delta f_m \\ \Delta e_{m+1} \\ \Delta f_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix}$ 、雅可比矩阵 J 如下:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_m}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta Q_m}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial P_{m+1}}{\partial e_1} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial e_m} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial f_m} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{m+1}}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta U^2_{m+1}}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial e_1} & \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial f_1} & \dots & \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial e_m} & \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial f_m} & \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial e_{m+1}} & \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial f_{m+1}} & \dots & \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial \Delta U^2_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{bmatrix}$$

雅可比矩阵中的各元素都是对式(2.25)求偏导所得。

若 $j=i$, 则雅可比矩阵中的对角元素如式(2.27)所示:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} &= -\sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - G_{ii}e_i - B_{ii}f_i \\
 \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} &= -\sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) - G_{ii}f_i + B_{ii}e_i \\
 \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i} &= \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) - G_{ii}f_i + B_{ii}e_i \\
 \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} &= -\sum_{j=1}^n (G_{ij}\Delta e_j - B_{ij}f_j) + G_{ii}e_i + B_{ii}f_i \\
 \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_j} &= -2e_i \\
 \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_i} &= -2f_i
 \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

若 $j \neq i$ ，则雅可比矩阵中的非对角元素如式(2.28)所示：

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} &= -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = -(G_{ij}e_i + B_{ij}f_i) \\
 \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} &= \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} = B_{ij}e_i - G_{ij}f_i \\
 \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_j} &= \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_j} = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

牛顿法进行“集中优化”的基本步骤如下：

- (1) 形成节点导纳矩阵 Y ；
- (2) 设各个节点电压的初值为： $e_i^{(0)}, f_i^{(0)}$ ；
- (3) 将各个节点电压的初值代入式(2.25)，得出修正方程式中的不平衡量 $\Delta P_i^{(0)}, \Delta Q_i^{(0)}, \Delta U_i^{2(0)}$ ；
- (4) 将各个节点电压的初值代入式(2.27)、式(2.28)，求雅可比矩阵的各个元素；
- (5) 解修正方程式，求出各个节点电压的修正量；
- (6) 计算各个节点电压的新值；
- (7) 检查是否满足收敛的条件，若不满足收敛的条件，则用各个节点电压的新值作为初值，从第(3)步重新开始进入下一次得迭代，否则转入到下一步；
- (8) 计算出平衡节点的功率和支路功率的分布。

牛顿法进行“集中优化”的流程图如图 2.1 所示：

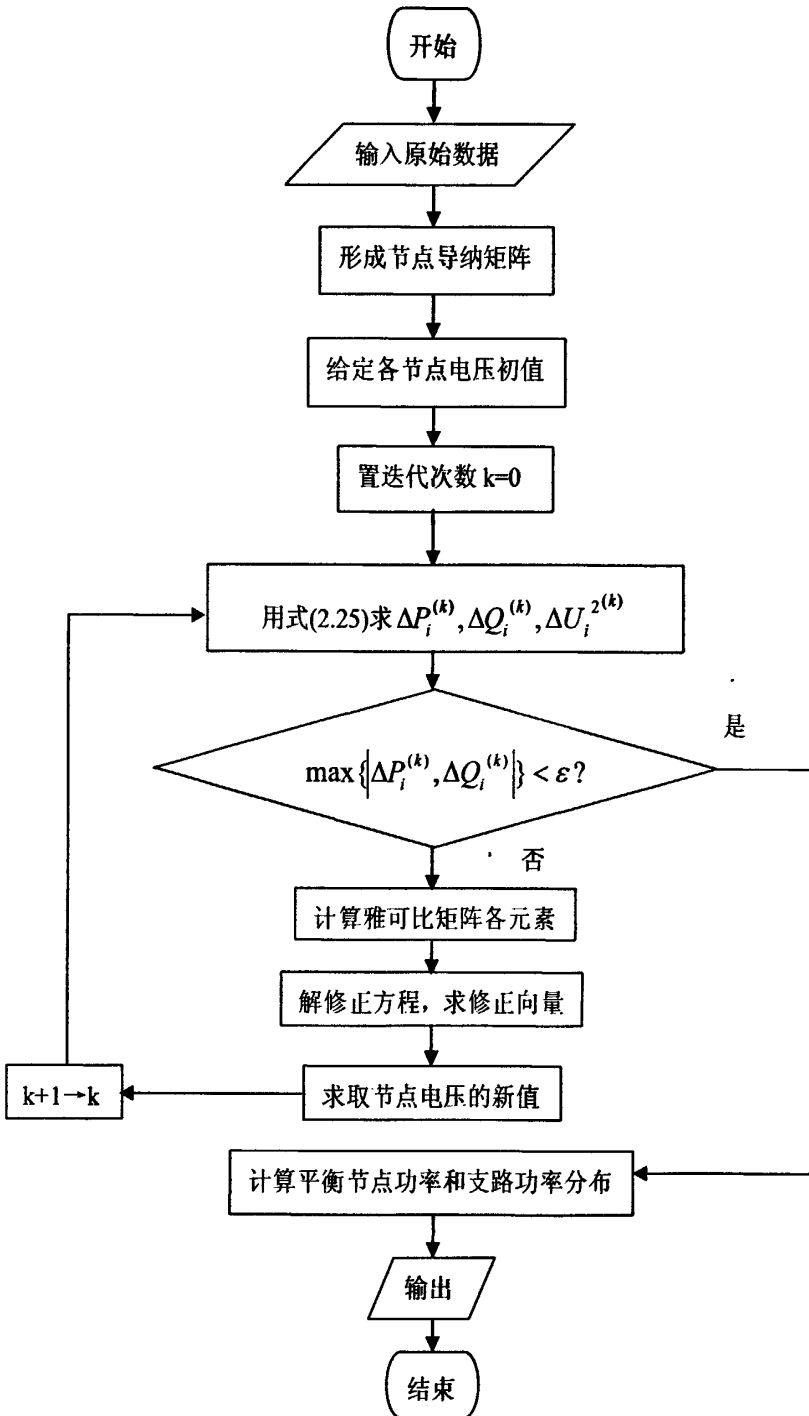


图 2.1 牛顿法进行“集中优化”计算流程图

Fig. 2.1 Flow chart of Newton method to operate “concentrated optimization”

2.3 无功优化过程中存在问题

通过无功优化概念可以看出，无功优化过程实际就是利用变压器或无功补偿

装置合理分配电网电压和无功的过程。第一章已经提出无功优化过程中存在的两个问题,在解决如何确定优化时刻问题之前,必须要首先解决依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻。如果全网每个节点依据各自的负荷变化情况来确定各自的优化时刻,由于各个节点负荷变化情况不同,容易造成各个节点的优化时刻不同,从而无法确定全网的优化时刻。因此,必须首先确定一个能够反映全网电压水平的节点,依据该节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻。

针对该问题,本论文提出了依据电网中先导节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻。下面一节详细介绍本论文采用的先导节点选择方法。

2.4 先导节点定义与选择

2.4.1 先导节点定义

当电力系统受到某种情况的扰动时,通过调节系统中的无功源使得某些节点的电压偏差为零,从而使得全网中各个节点的电压偏差最小,这些节点就被称为先导节点^[40]。先导节点具有较好的鲁棒性,它的电压水平能充分反映全网的电压水平^[51]。当系统电压扰动时,通过采用一定措施使得先导节点的电压能够恢复到以前的水平,则全网中各个节点的电压偏差最小。

由于先导节点在全网各个节点中的特殊重要性,本论文通过依据全网中先导节点的负荷变化情况来确定优化时刻,该方法能很好地解决无功优化过程中存在的第二个问题。因此,选择较好的先导节点选择方法是比较关键的。

通过分析现有先导节点选择方法的缺陷,本论文采用潮流灵敏度矩阵选择全网中的先导节点。

2.4.2 潮流灵敏度矩阵

潮流灵敏度矩阵是用来表示潮流方程中变量之间线性关系的^[49]。设负荷节点电压矢量是 V_L ,发电机节点电压矢量是 V_G ,下面介绍过程中用到的下标 L 和 G 是用来区别负荷节点与发电机节点的量。

(1) ΔV_L 与 ΔV_G 之间的灵敏度矩阵

ΔV_L 与 ΔV_G 之间的灵敏度矩阵是用来表示负荷节点电压变化与发电机节点电压变化之间的灵敏度关系, 当改变发电机节点电压 ΔV_G 时, 假定此时负荷节点的无功功率 Q_L 是不变的, 此时负荷节点的电压将会发生改变, 该变量为 ΔV_L 。

在快速解耦潮流方法中, 有 Q-V 的迭代方程如式(2.29)所示:

$$-\begin{bmatrix} L_{LL} & L_{LG} \\ L_{GL} & L_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_L \\ \Delta V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_L \\ \Delta Q_G \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

式(2.29)是一个 n 阶方程, 式中, L_{LL} 是雅可比矩阵中的 $\frac{\partial \Delta Q}{\partial V^T}$, L_{LG} 、 L_{GL} 是负荷节点与发电机节点之间的互导纳, L_{GG} 是发电机节点的自导纳。

当调节 V_G 时, 假设负荷节点的注入无功功率保持不变, 即 $\Delta Q_L = 0$, 则式(2.29)中的第一个式子便可写为:

$$L_{LL}\Delta V_L + L_{LG}\Delta V_G = -\Delta Q_L = 0 \quad (2.30)$$

则有:

$$\Delta V_L = S_{LG}\Delta V_G \quad (2.31)$$

在式(2.31)中,

$$S_{LG} = -L_{LL}^{-1}L_{LG} \quad (2.32)$$

在式(2.32)中, S_{LG} 是 ΔV_L 与 ΔV_G 之间的灵敏度矩阵。知道了该灵敏度矩阵, 就可以知道那些发电机节点电压对负荷节点电压能有效控制。

(2) ΔV_L 与 ΔQ_G 之间的灵敏度矩阵

在改变发电机节点电压时, 实际上改变了发电机无功功率的输出。通过上面的式(2.29), 可以写出 ΔV 与 ΔQ 之间的关系式:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_L \\ \Delta V_G \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} L_{LL} & L_{LG} \\ L_{GL} & L_{GG} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta Q_L \\ \Delta Q_G \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

设:

$$\begin{bmatrix} R_{LL} & R_{LG} \\ R_{GL} & R_{GG} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} L_{LL} & L_{LG} \\ L_{GL} & L_{GG} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.34)$$

当发电机节点的无功功率输出发生变化时,假设负荷节点的无功功率保持不变,即 $\Delta Q_L = 0$,则有:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_L \\ \Delta V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{LG} \\ R_{GG} \end{bmatrix} \Delta Q_G \quad (2.35)$$

即:

$$\Delta V_L = R_{LG} \Delta Q_G \quad (2.36)$$

R_{LG} 就是 ΔV_L 与 ΔQ_G 之间的灵敏度矩阵。

(3) ΔV_G 与 ΔQ_G 之间的灵敏度矩阵

当发电机节点的电压发生变化时,发电机节点的无功功率并没有发生变化, ΔV_G 与 ΔQ_G 之间的灵敏度关系是由网络本身的电气特性所决定的。假设发电机节点的无功功率发生变化时,负荷节点的无功功率没有变化,由式(2.35)我们可以得到:

$$\Delta V_G = R_{GG} \Delta Q_G \quad (2.37)$$

由式(2.34)我们可以得到:

$$R_{GG} = -(L_{GG} - L_{GL} L_{LL}^{-1} L_{LG})^{-1} \quad (2.38)$$

R_{GG} 就是 ΔV_G 与 ΔQ_G 之间的灵敏度矩阵。

2.4.3 潮流灵敏度矩阵求解先导节点

在选择先导节点时,一定要看节点是否能够代表该区域的电压水平,工程上经常用到的最简单直接的方法就是选择电力系统中具有最大的短路容量的一些节点作为先导节点,因为这些节点与系统的其它节点有着密切的关系。由于电力系统中存在着不同的结构和运行方式,潮流灵敏度矩阵又能充分反映电力系统中的结构和运行方式^[52],因此,本论文采用潮流灵敏度矩阵实现全网中先导节点的选择,通过该方法选择出鲁棒性较好的先导节点。

首先,电力系统可以用式(2.39)的线性化模型来表示:

$$\begin{bmatrix} R_{GG} & R_{GL} \\ R_{LG} & R_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_G \\ \Delta Q_L \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

其中, ΔV_G 为发电机节点的电压变化量; ΔQ_G 为发电机节点的无功功率变化量; ΔV_L 为负荷节点的电压变化量; ΔQ_L 为负荷节点的无功功率变化量; R_{LG} 、 R_{LL} 、 R_{GL} 、 R_{GG} 分别为潮流灵敏度矩阵。

如果电力系统受到随机负荷的扰动, 该系统的期望值便为零, 标准差与系统扰动前节点的无功负荷成正比, 假定定义系统的协方差矩阵为 $C_{LL} = E\{\Delta Q_L^T \Delta Q_L\}$, $E\{\}$ 为系统的期望值。

假设电力系统中需要选择的先导节点的个数为 P , 那么可以定义先导节点的选择矩阵为 $C = [c_{ij}]$, $C \in R^{P \times N_L}$, 其中, N_L 为负荷节点的个数。把负荷节点从 1 到 N_L 进行编号, 如果第 j 个负荷节点被选定为先导节点, 该先导节点集中系统中的第 i 个先导节点, 则有 $c_{ij} = 1$, 否则 $c_{ij} = 0$ 。当电力系统受到上述的扰动后, 先导节点的电压变化量为:

$$\Delta V_P = C \Delta V_L \quad (2.40)$$

由式(2.39)可以推导得出:

$$\Delta V_L = M \Delta Q_L + B \Delta V_G \quad (2.41)$$

其中, $M = R_{LL}^{-1}$; $B = -R_{LL}^{-1} R_{LG}$ 。

假定通过控制电力系统, 使得先导节点的电压值恢复到未扰动时的值, 即 $\Delta V_P = 0$ 。由式(2.40)和式(2.41)可以推导得到:

$$\Delta V_P = C B \Delta V_G + C M \Delta Q_L \quad (2.42)$$

由式(2.42)可以得出发电机节点的电压的调整量:

$$\Delta V_G = -F C M \Delta Q_L \quad (2.43)$$

其中, $F = (C B)^T (C B B^T C^T)^{-1}$ 。

将式(2.43)代入到式(2.41)中得到:

$$\Delta V_L = (1 - B F C) M \Delta Q_L \quad (2.44)$$

先导节点的选择如果是为了保证电力系统受到扰动后全部负荷节点的电压

偏差最小，那么这样的目标函数可以描述为下面的目标函数的极小化问题，即：
通过选择 C 使得目标函数可以达到最小，目标函数可以定义为：

$$I(C) = E\{\Delta V_L^T Q_x \Delta V_L\} \quad (2.45)$$

其中， Q_x 被称为对角加权矩阵，该矩阵可以通过负荷之间相对的重要性来进行确定具体的数值。

将式(2.44)代入式(2.45)中得到：

$$\begin{aligned} I(C) &= E\left\{\left[(1-BFC)M\Delta Q_L\right]^T Q_x \left[(1-BFC)M\Delta Q_L\right]\right\} \\ &= \text{trace}\left\{P_L(1-BFC)^T Q_x (1-BFC)\right\} \\ &= \text{trace}\{P_L Q_x\} - \text{trace}\left\{\left(2H_1 - H_2 H_3^{-1} H_4\right) H_3^{-1}\right\} \end{aligned} \quad (2.46)$$

其中， $P_L = MC_{LL}M^T$ ； $H_1 = CP_L Q_x BB^T C^T$ ； $H_2 = CBB^T Q_x BB^T C^T$ ； $H_4 = CP_L C^T$ ； $\text{trace}\{\}$ 为矩阵的对角线元素的和。

由于 P_L 、 Q_x 与 C 都没有关系，因此，式(2.45)所定义的目标函数的最小化问题可以转变为式(2.47)的最大化的问题：

$$I^*(C) = f(x) \quad (2.47)$$

其中，

$$f(x) = \text{trace}\left\{\left(2H_1 - H_2 H_3^{-1} H_4\right) H_3^{-1}\right\} \quad (2.48)$$

通过上面的步骤，先导节点如何选择的问题可以等效为下面的整数规划的问题，即：

$$\begin{aligned} &\max f(x) \\ &st \begin{cases} A_p \subset A \\ C(A_p) \leq P \end{cases} \end{aligned} \quad (2.49)$$

其中， A 为全部负荷节点的集合； A_p 为全部先导节点的集合； $C(\)$ 为整个集合所有元素的总数； P 为系统要求的先导节点总的个数。

本论文通过该方法确定全网中的先导节点，通过依据全网中先导节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻，该方法很好地解决了优化过程中各个节点的优化时刻无法实现相互协调的问题，为本论文下一步如何确定优化时刻打下了基

础。

2.5 本章小结

本章针对现有无功优化控制系统存在的缺陷，提出了“集中优化”的方式。详细介绍了“集中优化”的数学模型及“集中优化”算法。重点提出了依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网优化时刻的问题，针对该问题，详细介绍了先导节点的定义及其利用潮流灵敏度矩阵进行先导节点的选择，为下一章进一步解决优化过程中如何确定优化时刻打下了基础。

第三章 基于负荷多重分形特征参量变时段方法

上一章中,重点解决了无功优化中依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网优化时刻问题,本章依据先导节点的负荷变化情况,提出了基于负荷多重分形特征参量变时段方法,以每天补偿设备的最大动作次数为目标,将先导节点一天 24 个时刻中多重分形特征参量类似的时段进行合并,从而得到全网合理的补偿时段,只对每个补偿时段进行优化,该方法大大减少了变压器和无功补偿装置的动作次数,很好地解决了无功优化中存在的如何确定优化时刻的问题。

3.1 分形理论概述

3.1.1 分形概念

1973年,曼德尔布罗特首先创立了分形几何学。所谓分形,其原意是指不规则、支离破碎等。分形几何学是以非规则几何形态为研究对象,它主要描述自然界中存在的一大类奇异结构,揭示了非线性系统中有序与无序的统一、随机性与确定性的统一。分形几何的建立,引起了许多学者的关注,它不仅在理论上,而且在实际应用中也具有十分重要的价值。

分形理论所研究的对象是非线性系统所产生的不可微、不光滑的几何体。如果一个集合的任意局部与整体以某种形式相似,那么该集合称为分形^[53]。具有分形的对象,它的任何局部无论是从空间尺度、时间尺度还是结构特征上,与整体都是相似的。除了整体与局部相似以外,整体与整体之间也是相似的。在复杂的非线性系统中,分形的独特性主要表现在它可以用分形维数描述整个系统,使系统从多变量转化为单变量,这一特点在工程方面具有十分重要的意义。

目前为止,分形理论已经广泛应用于非线性动力学、数学、材料科学、图像分析以及计算机科学等领域。

3.1.2 分形的特征

到目前为止,在理论方面,对于分形还没有确切的定义,更多的是从分形所具有的一些特征来进行定义。分形的主要特征有以下几点:

(1) 自相似性

一个系统的自相似性就是指它的某个结构或者过程的特征无论是从不同的空间尺度或者时间尺度来说都是相似的,或者系统的整体与整体之间、局部与整体之间以及局部与局部之间是相似的。

(2) 标度不变性

一个系统的标度不变性是指分形上的任意一个局部区域,对其进行放大,得到的放大图从形态、复杂的程度以及不规则性等各方面特征都会显现出原图的形态特征,因此,标度不变性又被称为伸缩对称性。

电力负荷系统是一个非线性系统,为了验证电力负荷是否符合分形的概念和特征,本文依据山东省某变电站35千伏母线(3-sg-35-001)采集(每五分钟采集一个数据)得到的连续4天的有功数据,得到了如图3.1所示的4天每天的负荷变化曲线。

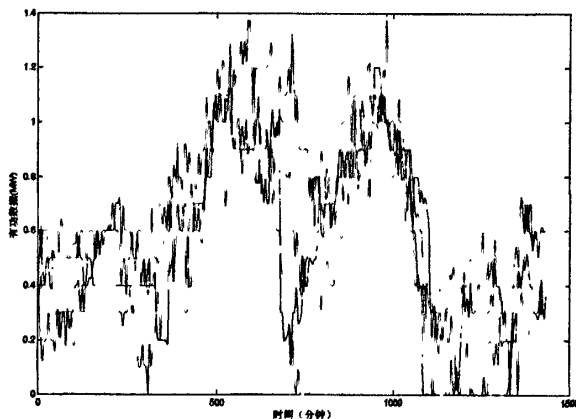


图 3.1 有功功率变化曲线

Fig. 3.1 The curve of active power

通过图3.1可以看出:负荷随时间的变化是随机的、不可预测的,每天相同时刻下的负荷数据是不一样的,但是每天负荷的变化趋势在时间尺度上是相似,又不是周期性的变化,大量无序的负荷数据中存在着有序,这种情况符合了分形的概念与特征。

3.2 电力负荷分形特征研究

3.2.1 分形时间序列的特征量

为了更加准确地从理论上研究电力负荷的分形特征,我们可以把每天负荷数据形成一个时间序列,研究电力负荷的分形特征也就是在研究电力负荷时间序列

的分形特征。分形时间序列的特征量主要有以下几点：

(1) 分形维 D

分形维 D 是分形时间序列一个重要的特征量，分形维 D 不仅是用来刻画非规则、非光滑以及特性复杂的分形体重要参数，而且是用来表征分形体复杂与粗糙程度的，分形维值 D 越大，分形体就越复杂越粗糙，分形维值 D 越小，分形体就越简单越细致。分形时间序列的分形维 D 是用来描述时间序列参差起伏程度的。

对于分形时间序列，分形维 D 与 Hurst 指数有内在的关系：

$$D = 2 - H \tag{3.1}$$

(2) Hurst 指数

Hurst 指数是分形理论中的一个重要特征量，它可以衡量一个时间序列的统计相关性^[54]。如果序列的 Hurst 指数值较高，则说明序列的趋势性较强而噪声较少；如果 Hurst 指数值较低，则趋势性较弱而噪声较多。Hurst 指数与其相应的时间序列可以分为以下四种类型：

①当 $H = 0.5$ 时，时间序列不同时间的值是随机、不相关的，也就是说现在的情况不会影响将来。

②当 $0 < H < 0.5$ 时，时间序列具有反持久性，即如果某个时间序列在前一时刻趋势是往上走的，那么它下一个时刻的趋势多半是往下走的。如果 H 值越接近于零，那么这个时间序列比随机时间序列更容易突变或变性。

③当 $0.5 < H < 1$ 时，时间序列具有持久性与长期记忆的特征，即如果某个时间序列在前一时刻趋势是往上走的，那么它下一时刻的趋势多半是往上走的。 H 值越接近于 1，时间序列的持久性越强。

④当 $H = 1$ 时，说明时间序列是完全可预测的，此时的时间序列是一条直线，即将来完全可以用现在进行预测。

(3) 分形分布

分形分布是统计上的一个自相似的概率密度函数，也就是说在不同时间增量上，统计的特征不变。

α 是一个时间序列概率空间上的分形维，它与前面的分形维 D 是不同的。当一个时间序列的 α 值介于 1 和 2 之间时，其特点是时间序列具有长期相关性(长

期记忆性)和统计自相似性,此时,该时间序列称之为分形时间序列。 α 的计算公式为^[54]:

$$\alpha = \frac{1}{H} \quad (3.2)$$

3.2.2 R/S 分析法及其具体步骤

R/S 分析法是由英国著名水文学家赫斯特(Hurst)提出的, R/S 分析法是判断时间序列具有分形特征的重要方法之一^[55],该方法能从具有分形结构的时间序列中区分出随机序列与非随机序列,通过 Hurst 指数判断出介于确定结构与随机结构之间的分形结构。为了更加准确的判断电力负荷的分形特征,可以将每天电力负荷数据形成时间序列,应用 R/S 分析法对电力负荷时间序列进行分析。

R/S 分析法计算 Hurst 指数具体步骤如下:

第一步:将长度为 N 的时间序列 $\{R\}$ 等分成长度为 $n(\geq 3)$ 的 A 个(取 N/n 的整数部分)连续的子序列,每个子序列记为 $D_a(a=1,2,\dots,A)$,并且每个子序列中的元素记为 $R_{k,a}$;

第二步:计算每个长度为 n 的子序列的均值: $e_a = (1/n) \sum_{k=1}^n R_{k,a}$;

第三步:计算每个子序列 D_a 偏离子序列均值的累积离差:

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (R_{i,a} - e_a);$$

第四步:计算各子序列 D_a 的极差: $R_a = \max(X_{k,a}) - \min(X_{k,a}), k=1,2,\dots,n$;

第五步:计算每个子序列 D_a 的标准差: $S_a = \sqrt{(1/n) \sum_{k=1}^n (R_{k,a} - e_a)^2}$;

第六步:计算每个子序列 D_a 的重标极差: $(R/S)_a = R_a / S_a$;

第七步:对每个子序列,重复第 2 步至第 6 步的计算,得到一个重标极差序列 $(R/S)_a$,计算时间序列的均值: $(R/S)_n = 1/A \sum_{a=1}^A (R/S)_a$;

第八步:将子序列的长度 n 增加到下一个更大的因子,重复上面第 1 步至第

7 步的计算, 直到 $n=N/2$, 然后依据方程 $\log(R/S)_n = \log C + H \log n$, 采用普通最小二乘估计方法进行估计, 得到一条拟合曲线, 从而得到拟合曲线的斜率, 即 H 指数。

经上述步骤所得到的 H 指数是判断时间序列具有分形特征的重要特征量。通过 H 指数可以计算得到时间序列的分形维 α , 如果 α 值介于 1 和 2 之间, 说明时间序列是分形时间序列。

3.2.3 电力负荷分形特征的验证结果

依据山东省某变电站 35 千伏母线(3-sg-35-001)采集(每五分钟采集一个数据)得到的连续 4 天负荷数据(每天数据为 288 个)中的任意 1 天的负荷数据得到一个负荷时间序列, 按照 R/S 分析法步骤编写程序, 得到如图 3.2 所示的 R/S 分析图。

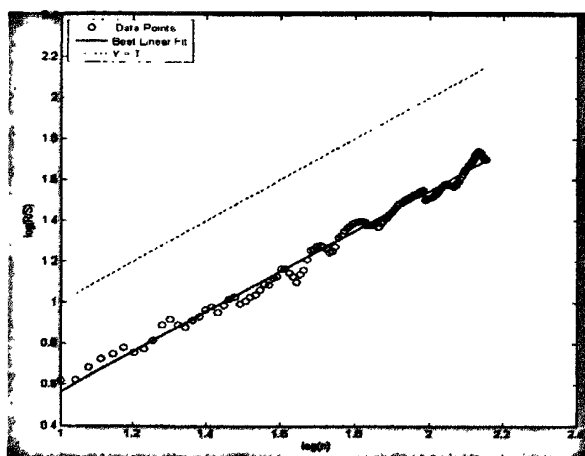


图 3.2 R/S 分析图

Fig. 3.2 R/S analysis diagram

上图中, 由“o”描绘得到的曲线是: 以 $\log(n)$ 为横坐标、 $\log(R/S)$ 为纵坐标的曲线。穿过上述曲线的红色细线代表的是: 用线性回归方法得到的拟合直线。通过上图可以得到以下结论:

(1) 通过程序可以得出 R/S 分析法的 H 指数(上图红线斜率)值为 0.9809, 该值介于 0.5 与 1 之间, 说明负荷时间序列具有长期记忆性, 负荷未来的变化与过去的变化相关。

(2) 通过上面所求出的 H 指数, 可以确定分形维 $\alpha = \frac{1}{H} = \frac{1}{0.9809} = 1.0195$, 该值介于 1 和 2 之间, 说明负荷时间序列是分形时间序列, 即电力负荷具有分形特

征。

3.2.4 V 统计量计算方法

在上一小节中,依据实际电网采集得到的负荷数据,通过R/S分析法计算得到 H 指数值为0.9809,该值介于0.5与1之间,说明负荷时间序列具有长期记忆性,未来的变化与过去的变化相关。时间序列所具有的长期记忆的长度就被称作平均循环长度,平均循环长度就是指未来信息受现在影响的一个平均的延续时间^[54]。如果时间序列在所求平均循环长度以外,那么该时间序列就失去了长期记忆的特性,即失去了分形特征。

V 统计量的计算公式如式(3.3)所示:

$$V_n = \frac{(R/S)_n}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

式(3.3)中的 n 和 $(R/S)_n$ 可以通过 R/S 分析法求解得到。因此,依据上节中采集得到的负荷数据,可以得到 V 统计量曲线图,如图 3.3 所示:

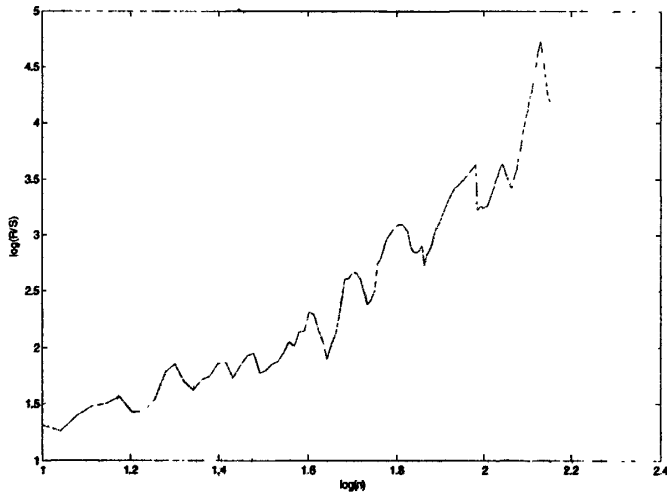


图 3.3 V 统计量图

Fig. 3.3 V Statistic figure

图 3.3 所得到的以 $\log(n)$ 为横坐标、 $\log(R/S)$ 为纵坐标曲线的走势由上升变为下降或者走势保持不变的那个点,就被称作负荷序列失去长期记忆特性的临界点,通过该临界点所对应的 $\log(n)$ 值便可求解得到 n 值,即平均循环长度。

V 统计量的计算可以为进行仿真时选择负荷数据提供理论基础,进行仿真试

验时,必须先实际电网中采集得到大量的负荷数据。由于具有分形特征的负荷时间序列都有平均循环长度,在平均循环长度之外,负荷就失去了长期记忆的特性,也就是说未来负荷的变化不再受现在信息的影响,负荷变化变成了随机游走的形式。因此,在进行仿真之前,必须通过采集得到的大量负荷数据计算得到负荷序列的平均循环长度,把平均循环长度之内的负荷数据作为仿真数据,该数据能够具有长期记忆的特征,即具有分形的特征。平均循环长度之外的负荷数据变成了随机游走的形式,因失去了分形特征被去除。

3.3 电力负荷多重分形特征研究

时间序列在其形成过程受到众多复杂非线性因素的影响,因此在不同局部区域或层次方面,往往表现出不同的特征和复杂性。对于这类复杂对象需要用多个甚至无限个分形维 D_q 进行描述,其中 D_q 称为广义分形维,这类对象被称为多重分形^[53]。多重分形特征更能反映序列在不同细节层次或不同局部区域的高级统计特征。

由于每天不同时刻的负荷数据受到众多复杂的非线性因素的影响,因此在不同时刻,负荷变化往往表现出不同的特征和复杂性。对每天负荷数据的变化情况用一个分形维参数来描述并不能完全反应一天每个时刻负荷的分形特征。这就需要研究电力负荷的多重分形特征,不同时刻的负荷变化需要使用不同的多重分形特征参量进行描述。

3.3.1 多重分形特征参量计算方法与意义

多重分形特征参量包括 D_q 、 α 、 $\Delta\alpha$ 、和 $f(\alpha)$ ^[56],不同的参量具有不同的意义。对于规则的多重分形可以通过统计物理方法或者解析的方法计算得到多重分形特征参量,对于不规则的多重分形只能通过统计物理方法计算得到多重分形特征参量。电力负荷数据每天受到众多复杂的非线性因素的影响,因此,电力负荷曲线是不规则的,因此,只能通过统计物理方法求解电力负荷的多重分形特征参量。下面就介绍如何利用统计物理的方法求解多重分形特征参量。

(1) 计算概率分布函数 $P(\varepsilon)$, 通过举例详细说明概率分布函数如何计算得

到。图 3.4 所示为一维的电力负荷曲线，电力负荷曲线可以看做是一维分布曲线。

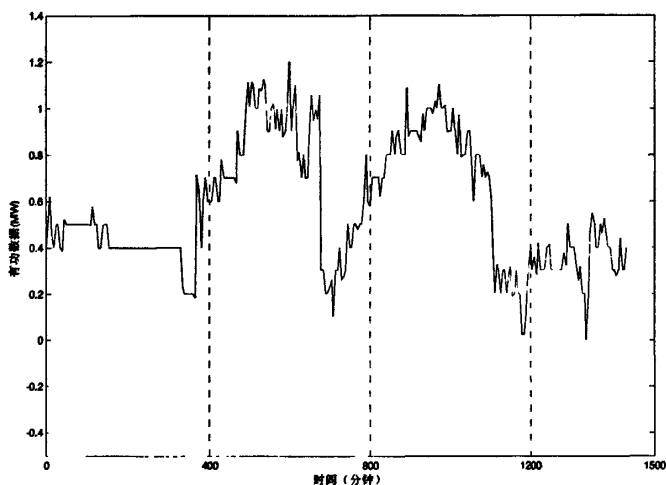


图 3.4 一维电力负荷曲线($\varepsilon=1/4$)

Fig. 3.4 The curve of one-dimensional power load($\varepsilon=1/4$)

图 3.4 的概率分布函数 $P(\varepsilon)$ 可以表达为:

$$P_i(\varepsilon) = S_i(\varepsilon) / \sum S_i(\varepsilon) \quad (3.4)$$

在上式中, ε 为将曲线按一定段数分段后每段的尺寸, 在图 3.4 中, 一维曲线被分成四段, 因此每段的尺寸为 $1/4$; $S_i(\varepsilon)$ 为分段后每段尺寸为 ε 时, 第 i 段内所有负荷数据的和; $\sum S_i(\varepsilon)$ 为整个曲线的全部负荷数据的和。

(2) 计算配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 。配分函数的求解就是对概率分布函数的 q 次方求和, 用数学表达式可以写成:

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum P_i(\varepsilon)^q = \varepsilon^{-r(q)} \quad (3.5)$$

在式(3.5)中, q 被称为权重因子, q 不同的取值在配分函数中起到不同作用。 $P(\varepsilon)$ 是一个概率, 它的值是介于 0 和 1 之间, 对它求 q 次方, 相当于一个幂函数, 因此, 当 $q \rightarrow +\infty$ 时, $P(\varepsilon)$ 值大的对配分函数起到决定作用; 当 $q \rightarrow -\infty$ 时, $P(\varepsilon)$ 值小的对配分函数起到决定作用。不同的 q 可以将多重分形体分成不同区域, 在理论上, q 的取值范围越大越好, 一般 q 的取值范围是取对应的正、负值之间。

(3) 通过配分函数的数学表达式可以看出, 配分函数 $\chi_q(\varepsilon)$ 与 ε 之间是幂函数的关系, 因此, 我们便可以求出 $\tau(q)$ 的值, 数学表达式可以写成:

$$\tau(q) = \frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} (\varepsilon \rightarrow 0) \quad (3.6)$$

通过式(3.6)可以看出, $\tau(q)$ 是 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 曲线的斜率。如果 $\ln \chi_q$ 随 $\ln \varepsilon$ 变化具有很好的线性关系, 就能充分说明被研究对象具有多重分形特征。

(4) 通过 $\tau(q)$ 推导出多重分形谱 $f(\alpha)$ 和 α 值, 由式(3.5)以及概率分布函数定义可以得出式(3.7):

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum P_i(\varepsilon)^q = \sum N(P)P^q \quad (3.7)$$

在式(3.7)中, $N(P)$ 表示为概率为 P 的数目。

由式(3.4)和式(3.5), 式(3.7)可以写为式(3.8):

$$\chi_q(\varepsilon) = \sum \varepsilon^{-f(\alpha)} \varepsilon^{\alpha q} = \sum \varepsilon^{\alpha q - f(\alpha)} = \varepsilon^{\tau(q)} \quad (3.8)$$

在式(3.8)中, 后面的等号是在被研究的对象属于多重分形条件时才能成立, 因此, 通过后面的等式相等, 式(3.8)可以改写为式(3.9):

$$\sum \varepsilon^{\alpha q - f(\alpha) - \tau(q)} = 1 \quad (3.9)$$

在式(3.9)中 $\varepsilon \rightarrow 0$, 如果 $\alpha q - f(\alpha) - \tau(q) > 0$, 那么求和后将趋于 0; 如果 $\alpha q - f(\alpha) - \tau(q) < 0$, 那么求和后将会无限大; 因此, 只有 $\alpha q - f(\alpha) - \tau(q) = 0$, 求和后才会等于 1, 即:

$$\tau(q) = \alpha q - f(\alpha) \quad (3.10)$$

因此, 由式(3.10)可以得到 α 值, 即:

$$\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad (3.11)$$

α 值求得后, 将式(3.11)代入式(3.10)便可求得多重分形谱 $f(\alpha)$ 的值, 即:

$$f(\alpha) = \alpha q - \tau(q) = \frac{qd\tau(q)}{dq} - \tau(q) \quad (3.12)$$

以上面介绍过的图3.4为例,图3.4中是将一维电力负荷曲线划分为四段, α 是一个奇异指数,它能反映图3.4中分形上每一段的奇异程度,若在分形上的测度是均匀的,则 α 值必然只是一个值。 $f(\alpha)$ 称为多重分形谱,图3.4中每一段所对应的 $f(\alpha)$ 值能够表征每一段曲线负荷数据的概率分布。多重分形谱 $f(\alpha)$ 的宽度可以用 $\Delta\alpha$ 来表示,即 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$,它反映了图3.4中每一段曲线负荷的起伏程度,即负荷的波动程度。 $\Delta\alpha$ 值越大,说明曲线负荷变化的波动程度越强。

通过分析,本文只研究电力负荷不同时刻的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 。 $\Delta\alpha$ 具有统计意义,某一时刻的 $\Delta\alpha$ 能够充分反映该时刻电力负荷变化的波动程度。 $\Delta\alpha$ 值越大,说明该时刻电力负荷变化的波动程度越强。依据不同时刻负荷的 $\Delta\alpha$ 值进行时段的划分,可以将负荷波动程度比较接近的时段划分为一段,这样既考虑了负荷数据的实时性,又减少了补偿设备的动作次数,在每天负荷变化速度快时提高无功电压调节频率,而在负荷变化慢时降低调节频率,提高了补偿效率。

3.3.2 电力负荷多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 计算步骤

本文只把电力负荷不同时刻的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 作为时段划分的依据,因此,下面介绍一下多重特征参量 $\Delta\alpha$ 计算步骤:

第一步:计算时间序列每段尺寸 $\varepsilon_n = n/N$ (n 可被 N 整除), N 为序列长度, n 为对序列进行等分,每段长度。 n 可取1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, ...;

第二步:计算时间序列的概率分布函数 $P_i(\varepsilon_n)$;

第三步:计算配分函数 $\chi_q(\varepsilon) = \sum P_i(\varepsilon)^q$ (q 为常数);

第四步:计算 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 曲线的斜率 $\tau(q) = \frac{\ln \chi_q(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} (\varepsilon \rightarrow 0)$;

第五步:计算 $\alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}$;

第六步:计算 $f(\alpha) = \alpha q - \tau(q)$;

第七步:计算 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$;

3.3.3 电力负荷多重分形特征的验证结果

本文在依据多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 进行时段划分前,必须证明电力负荷是具有多重分形特征的。判断电力负荷是否具有多重分形特征,要通过计算 $\tau(q)$ 的值得到 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 曲线,如果 $\ln \chi_q$ 随 $\ln \varepsilon$ 变化具有很好的线性关系,就能充分说明电力负荷具有多重分形特征,否则电力负荷不具有多重分形特征。

依据山东省某变电站35千伏母线(3-sg-35-001)采集(每五分钟采集一个数据)得到的连续4天的负荷数据(每天数据为288个),形成一个负荷时间序列(1152个数据),依据上一小节中多重特征参量 $\Delta\alpha$ 计算步骤(第一步到第七步)编写程序,得到如图3.5所示的 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 变化曲线、如图3.6所示的负荷时间序列的多重分形谱图。

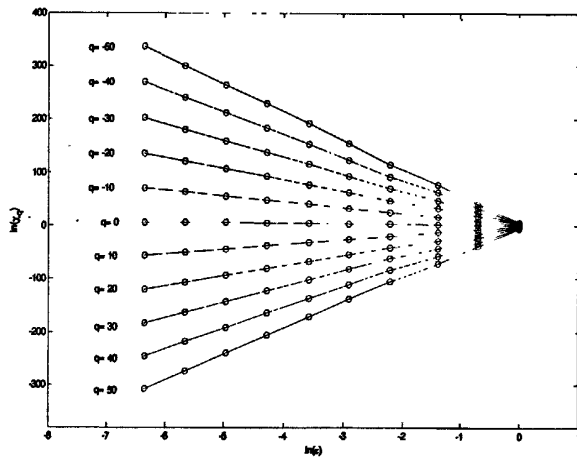


图 3.5 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 曲线

Fig. 3.5 The curve of $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$

通过图3.5可以看出,依据负荷数据得到的 $\ln \chi_q \sim \ln \varepsilon$ 曲线, $\ln \chi_q$ 随 $\ln \varepsilon$ 变化具有很好的线性关系,充分说明了电力负荷数据具有多重分形特征,并且表明负荷数据满足分形特征的标度不变性,即每天负荷的变化具有相似性。

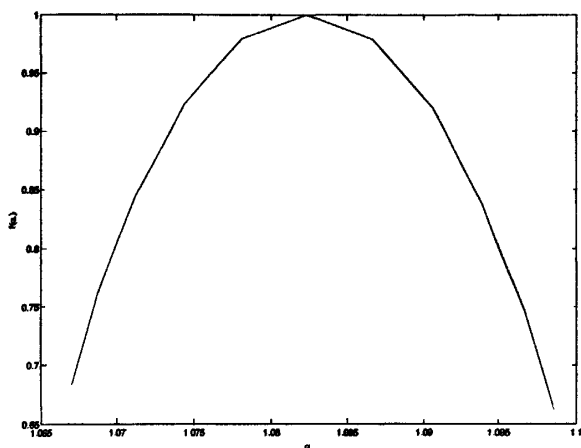


图 3.6 多重分形谱图

Fig. 3.6 The multi-fractal spectrum diagram

图3.6中，曲线所对应横坐标 α 值的最大值与最小值之差就是所用负荷数据的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 的值， $\Delta\alpha$ 充分反映电力负荷变化的波动程度。

3.4 基于负荷多重分形特征参量变时段方法思想

在证明电力负荷具有分形特征及多重分形特征前提下，通过分析得到多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 具有统计意义，能够充分反映电力负荷变化的波动程度。因此，本论文提出了基于多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 变时段方法，该方法的基本思想如下：

首先将通过先导节点采集得到的大量负荷数据形成电力负荷时间序列，计算电力负荷时间序列的平均循环长度，即电力负荷时间序列具有长期记忆特性的长度，将在平均循环长度之内的负荷数据作为分时段所用数据，将超出平均循环长度的负荷数据去除，因为该数据已经不再具有长期记忆特性，失去了分形的特征。将最终确定在平均循环长度之内的负荷数据每天同时刻的负荷数据形成 1 个负荷时间序列，即可以得到一天 24 个时刻所对应的 24 个负荷时间序列。通过多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 的求解步骤，计算得到每个负荷时间序列的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ ，即每个时刻的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ ，该多重分形特征参量能充分 $\Delta\alpha$ 反映该时刻电力负荷变化的波动程度。以每天最大动作次数为目标，利用谱系聚类算法，合并多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 类似的时刻，即将波动程度类似的相邻时刻划分为同一时段，从而得到合理的补偿时段。

3.5 谱系聚类算法

谱系聚类算法是模式识别中的一种聚类方法,它的基本思想就是将样本中集中距离最近的两个样本合并为一类,然后迭代这一过程,不断将聚类域中距离最近的两类合并为一类,直到类间的最小距离大于预先给定的阈值为止。

本论文应用谱系聚类算法进行时段划分的思想为:在确定调节设备日最大动作次数(分段数目)后,把一天已知的24小时负荷看作24个时刻,每个时刻作为一类。假如 t 时刻系统的无功负荷为 Q_t ,把相邻时刻 t 和 $t+1$ 的负荷变化量绝对值作为第 t 和 $t+1$ 类的距离:

$$\Delta Q_t = |Q_{t+1} - Q_t| \quad (3.13)$$

式(3.13)中24小时的 ΔQ_t 组成一个距离向量 D ,将 D 中最小的 ΔQ_t 对应的2个类即第 t 和 $t+1$ 类合并为第 t 类,即时刻 t 和 $t+1$ 合并为一个时段记为时段 t , $t+1$ 类后面的所有类均比原序号前移1,合并后新的到的第 t 类的等值负荷为:

$$Q_t = \frac{Q_t i + Q_{t+1} j}{i + j} \quad (3.14)$$

式(3.14)中 i 和 j 分别表示第 t 和 $t+1$ 类的负荷点个数。

重复以上计算过程,直到负荷划分为确定的调节设备日最大动作次数(分段数目),分段计算结束。

3.6 基于负荷多重分形特征参量变时段方法流程图

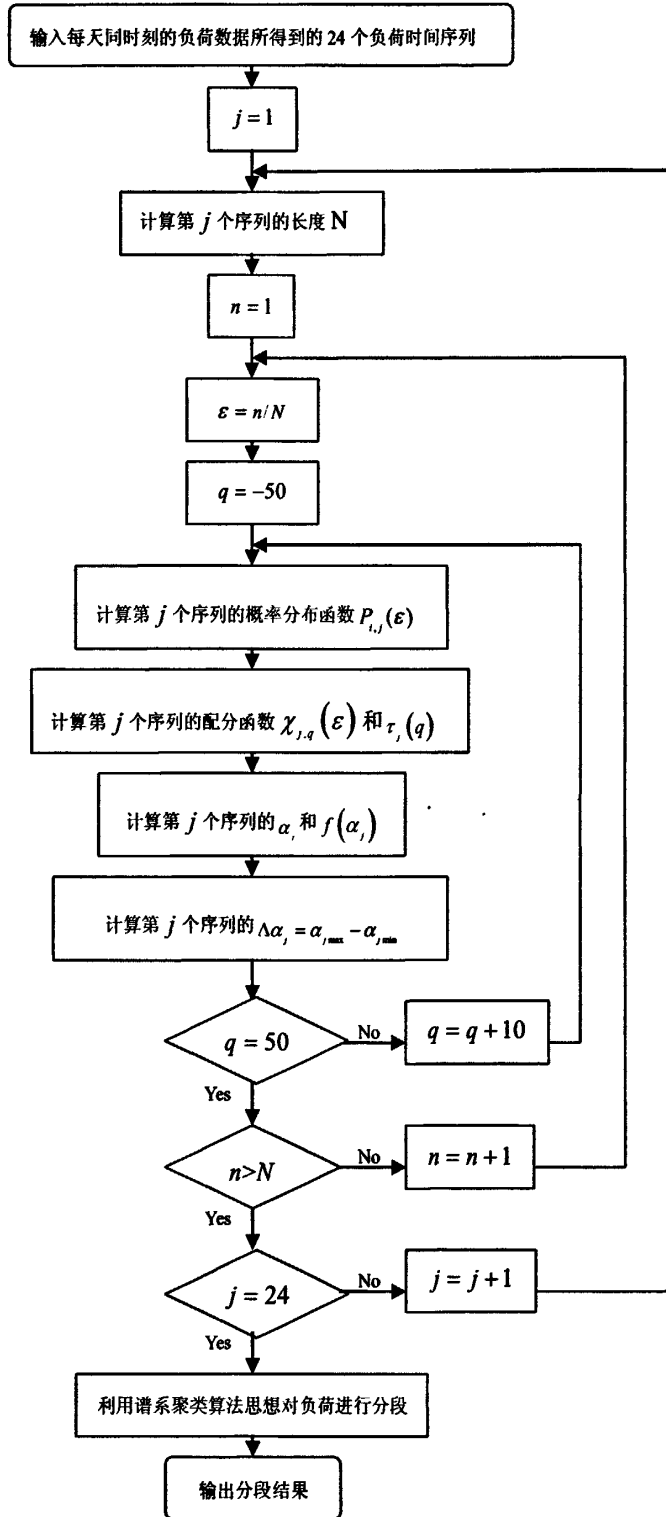


图 3.7 基于负荷多重分形特征参量变时段方法流程图

Fig. 3.7 Flow chart of the multi-period method based on the multi-fractal parameter

3.7 基于负荷多重分形特征参量变时段方法的仿真及结果分析

3.7.1 仿真所用负荷数据

由于具有分形特征的负荷时间序列都有平均循环长度，在平均循环长度之外，负荷就失去了长期记忆的特性，也就是说未来负荷的变化不再受现在信息的影响，负荷变化变成了随机游走的形式。因此，在进行仿真之前，必须通过采集得到的大量负荷数据计算得到负荷序列的平均循环长度，把平均循环长度之内的负荷数据作为仿真数据，该数据能够具有长期记忆的特征，即具有分形的特征。平均循环长度之外的负荷数据变成了随机游走的形式，因失去了分形特征被去除。

在进行仿真之前，把从山东省某变电站 35 千伏母线(3-sg-35-001)采集(每五分钟采集一个数据)得到的一年负荷数据形成一个负荷时间序列，然后利用 V 统计量的计算方法计算得到该负荷时间序列的平均循环长度，把平均循环长度之内的负荷数据作为仿真数据。

依据 V 统计量的计算方法，通过编写程序，得到如图 3.8 所示的 V 统计量图：

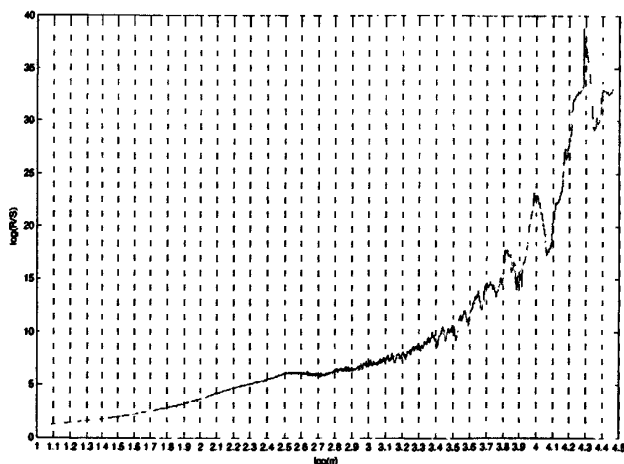


图 3.8 V 统计量图

Fig. 3.8 V Statistic figure

图 3.8 所得到的以 $\log(n)$ 为横坐标、 $\log(R/S)$ 为纵坐标曲线的走势由上升变为下降或者走势保持不变的那个点，就被称作负荷序列失去长期记忆特性的临界点，在图 3.8 中可以看出，负荷序列失去长期记忆特性的临界点对应的 $\log(n)$

值为 4.3, 因此, 通过公式 $\log(n)=4.3$ 便可求解得到 n 值为 19953。由于我们在采集数据时用到的单位是分钟, 因此, 所用负荷数据的平均循环长度应该为: $19953/60=333$, 即我们仿真所用数据为一年内 333 天的负荷数据, 该数据具有很好的长期记忆特性, 剩余 32 天的负荷数据删除掉, 该数据已经失去了长期记忆特性, 变成了随机游走的形式。

确定了仿真所用数据为一年内 333 天的负荷数据之后, 要对这些数据做如下处理:

首先, 将每天的负荷数据做如下处理: 把每个小时内采集到的负荷数据(12 个)求平均值, 该平均值代表对应时刻的负荷数据。依据该处理方法, 便可以重新得到 333 天的负荷数据(每天数据为 24 个)。

其次, 依据重新得到的 333 天的负荷数据(每天数据为 24 个), 将每天相同时刻的负荷数据形成一个负荷时间序列, 便可以得到 24 个时刻所对应的 24 个负荷时间序列, 每个时间序列包含一年 333 天相同时刻的负荷数据。

3.7.2 基于负荷多重分形特征参量变时段方法分时段仿真结果及分析

在实际电力系统运行优化过程中, 负荷是实时波动的, 为了保证电力系统运行中处于最优的状态, 理论上需要实时地对其进行优化, 通过调节变压器的分接头或者无功补偿装置电容器的投切, 实现系统无功的合理配置。然而, 变压器的分接头或者电容器都是具有使用寿命的, 频繁的动作会减少无功设备的使用寿命, 因此, 利用分时段方法进行分段之前, 必须要结合实际来设定无功设备每天的最大动作次数, 本论文设定补偿装置每天最大动作次数为 8 次。

在确定了补偿装置每天最大动作次数以后, 将上一小节一年 333 天相同时刻负荷数据所形成的 24 个时刻所对应的 24 个负荷时间序列作为仿真数据, 依据图 3.7 基于负荷多重分形特征参量分时段方法流程图进行编写程序, 通过仿真, 最终得到: 如图 3.9 所示的 24 个负荷时间序列每个时间序列的多重分形谱图(α 与 $f(\alpha)$ 之间关系图)、如表 3.1 所示的 24 个负荷时间序列每个负荷时间序列的多重分形参数 $\Delta\alpha$ 值和如表 3.2 所示的基于多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 分时段方法的分

段结果以及分段后每个新时段的多重分形参数 $\Delta\alpha$ 值。

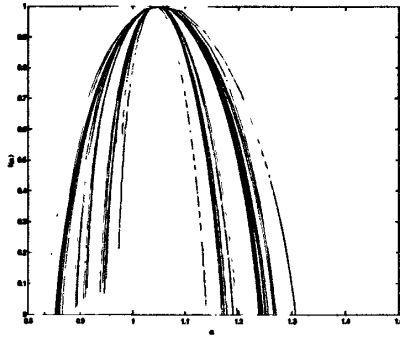


图 3.9 24 个负荷时间序列每个时间序列的多重分形谱图

Fig. 3.9 Multi-fractal spectrums of 24 load time series

在图 3.9 中，每一个曲线代表一个时刻所对应的负荷时间序列的多重分形谱 $f(\alpha)$ ，因为每个时间序列是由一年 333 天相同时刻的负荷数据形成的，因此每个 $f(\alpha)$ 能够表征一年 333 天该时刻所有负荷数据的概率分布情况。每一个曲线的宽度可以用多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 的值来表示，即 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ ，它能够反映一年 333 天相同时刻负荷数据的起伏程度，即负荷数据的波动程度。 $\Delta\alpha$ 值越大，说明一年 333 天相同时刻负荷数据变化的波动程度越强。由图 3.9 可以计算得到如表 3.1 所示的 24 个负荷时间序列每个负荷时间序列的多重分形参数 $\Delta\alpha$ 值。

表 3.1 每个序列的多重分形参量 $\Delta\alpha$ 值

Table 3.1 Multi-fractal parameter $\Delta\alpha$ of each series

时刻	每时刻多重分形参量 $\Delta\alpha$ 值	时刻	每时刻多重分形参量 $\Delta\alpha$ 值
1	0.379	13	0.372
2	0.379	14	0.336
3	0.388	15	0.339
4	0.391	16	0.365
5	0.387	17	0.384
6	0.381	18	0.448
7	0.395	19	0.228
8	0.435	20	0.251
9	0.192	21	0.246
10	0.226	22	0.222
11	0.227	23	0.165
12	0.338	24	0.372

在表3.1中，每个时间序列所对应的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 的值能够反映一年

333天相同时刻负荷数据的起伏程度,即负荷数据的波动程度。以每天最大动作次数8次为目标,利用谱系聚类算法,合并多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 类似的相邻时刻,即将负荷数据波动程度类似的相邻时刻划分为同一时段,从而得到合理的补偿时段。这样既考虑了负荷数据的实时性,又减少了补偿设备的动作次数,在每天负荷变化速度快时提高无功电压调节频率,而在负荷变化慢时降低调节频率,提高了补偿效率。分段结果如表3.2所示:

表 3.2 分段结果
Table 3.2 Classification result

时段	时刻	每段多重分形参量 $\Delta\alpha$ 值
1	1~7	0.3887
2	8	0.4359
3	9~11	0.2097
4	12~17	0.3608
5	18	0.4481
6	19~22	0.2305
7	23	0.1657
8	24	0.3728

通过表 3.2 可以看出:无论工作日还是非工作日,1 天中,人们在第 1 到 7 时刻这段时间内几乎都是休息的,每天 1 到 7 时刻负荷变化波动程度相差不大,即 1 到 7 时刻多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 的值比较类似。然而,在第 8 时刻人们开始用电,相对于 1 到 7 时刻的负荷变化波动程度,第 8 时刻负荷变化波动程度较大,即多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 的值较大;第 9 时刻人们开始正常用电,负荷变化波动趋于稳定,相对于第 9 时刻的负荷变化波动程度,第 8 时刻负荷变化波动程度仍较大。因此,第 8 时刻划分为一个时段。其它的分段结果也符合这样的思想。因此,通过表 3.2 的分析可以看出,本文所提出的基于多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 的变时段方法是有效的,实现了在每天负荷变化速度快时提高无功电压调节频率,而在负荷变化慢时降低调节频率。达到了既减少补偿设备动作次数,又提高补偿效率的目的,解决了无功优化过程中如何确定优化时刻的问题。

3.8 本章小结

本章详细论述了分形以及多重分形的概念和特征,验证了电力负荷分形特征以及多重分形特征。通过分析多重分形特征参量的意义,选定了本论文变时段方法用到的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 。详细论述了基于负荷多重分形特征参量变时段方法的思想及方法的流程图。以 MATLAB 为工具,编写变时段算法程序,并进行仿真、调试。通过对经变时段所得到的分段结果进行分析,验证了基于多重分形特征参量变时段方法很好地解决了无功优化过程中如何确定优化时刻的问题。

第四章 高可靠性变时段区域电网无功优化技术实际应用

本章将本论文提出的先导节点选取方法和变时段方法应用到实际电网优化中，通过先导节点的负荷变化情况得到全网合理的补偿时段，在各个补偿时段进行实际优化。通过实际优化结果，证明本论文所提出方法的有效性。

4.1 Power CL 无功优化系统

4.1.1 系统结构

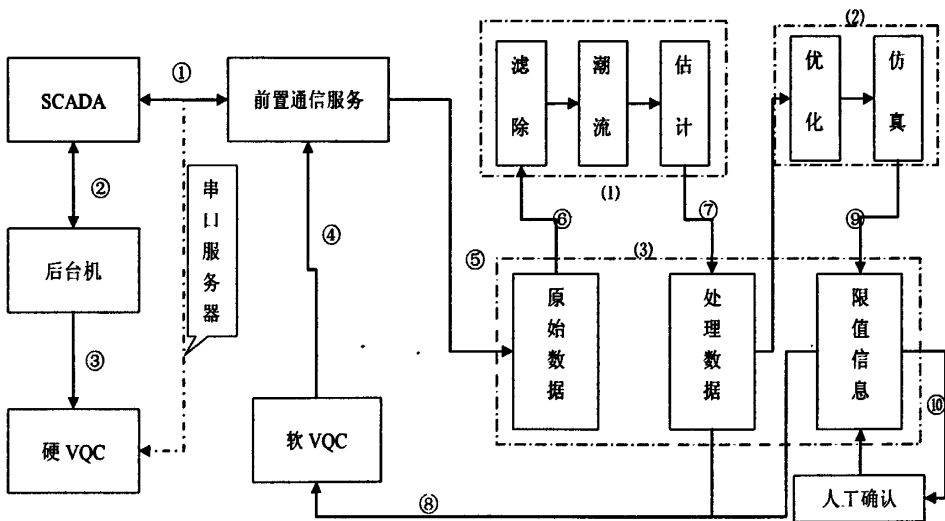


图 4.1 Power CL 无功优化系统结构图

Fig. 4.1 The chart of Power CL reactive power optimization system

Power CL 无功优化系统结构图说明如下：

(1)是状态估计模块

(2)是优化算法模块

(3)是数据库服务

① 是采集数据和指令数据

② 是采集数据和指令数据

③ 是指令数据

④ 是指令数据

⑤ 是采集数据

- ⑥ 是把采集数据送入潮流估计模块
- ⑦ 是把计算之后的数据填入数据库
- ⑧ 是获取数据库中优化后的限值信息和实时数据
- ⑨ 是经过优化仿真之后得到的优化方案进行手工确认
- ⑩ 是手工确认后的优化限值信息填入数据库

4.1.2 工作流程

电网的结构、变压器、线路参数、运行方式等数据，在事先录入到档案数据库中，程序自动形成拓扑结构，以备计算。

前置通信服务模块从电网 SCADA 系统采集实时运行数据，包括：

遥测量：各节点电压；流过各开关的有功功率、无功功率、电流、功率因数；变压器有载调压分接头的位置。

遥信量：各关键开关的状态，各母联开关的状态。

以上数据每隔 10s 送入数据库中，形成原始数据表。

潮流计算与状态估计模块对原始数据进行挑选，剔除明显错误的测量点，并用加权最小二乘法估计电网的运行状态。某些缺少的关键点数据，需要采用人工置数的方式设定初值。估计完成后的数据放入数据库的处理数据表中。由服务器调用优化计算和仿真程序，针对处理数据表中的数据进行优化计算和仿真输出。将计算结果扩展成各受控节点电压无功上下限的形式发送给数据库的限值信息表。软件 VQC 模块从处理数据表中读取实时数据，并从限值信息表中读取所对应受控节点的电压无功上下限值，按照“井”字型补偿方法控制相应变压器分接头位置和电容器组的投切。以上命令的发布通过前置通信服务模块传送给 SCADA，由 SCADA 发送指令信号。

有的变电站安装有硬件 VQC，此时不必使用软件 VQC。控制系统可直接把计算出的电压无功限值信息发送给硬件 VQC 即可。

电压无功限值信息的发布主要依据 2 种优化模式而定：在线优化模式和离线优化模式。

4.1.3 离线优化模式

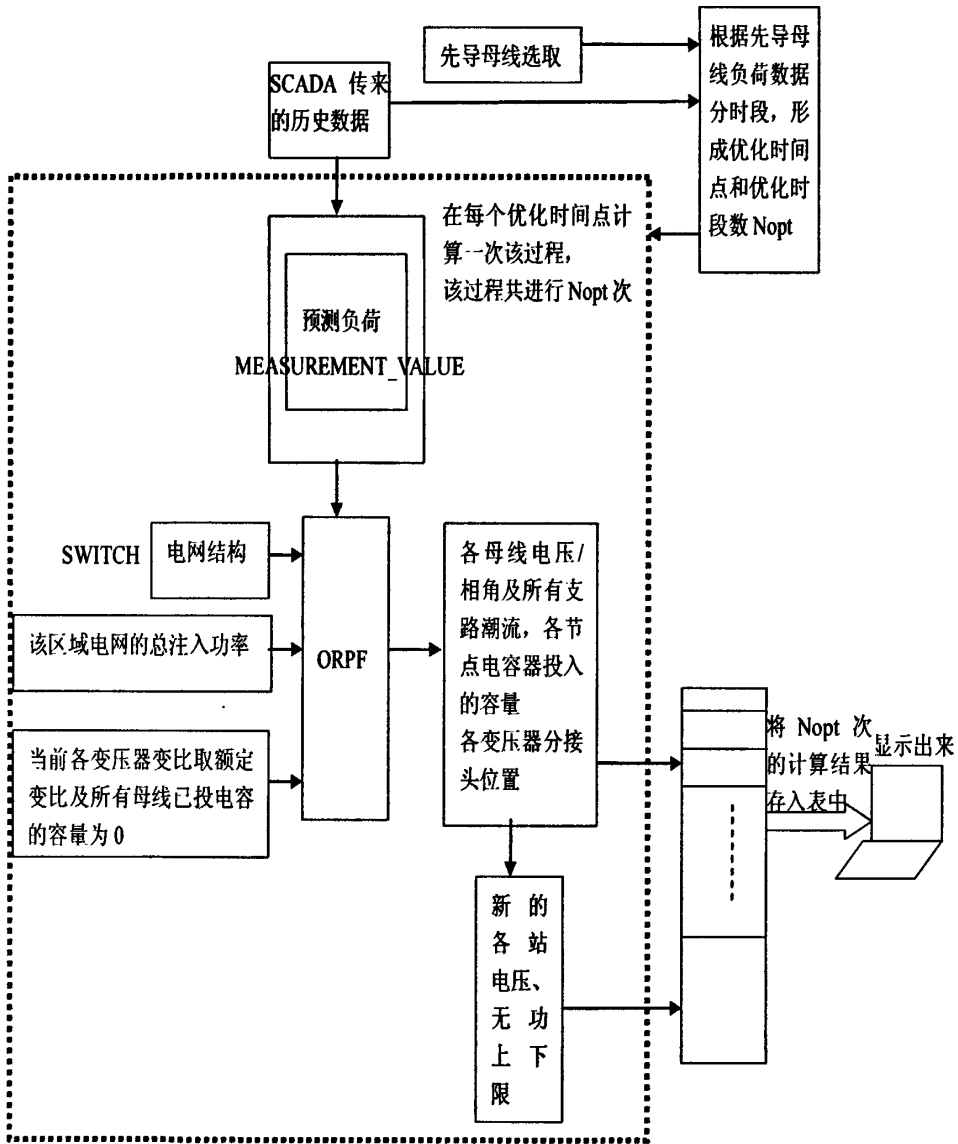


图 4.2 离线优化方案图

Fig. 4.2 The chart of offline optimization scheme

功能：离线优化模式是，控制系统不直接发布优化命令，而是把预测一天的控制策略发布给运行人员。这种模式适用于优化软件安装运行初期，以方便运行人员观察每日的控制方案，确认方法的有效性，为在线优化模式的运行打下基础。

优化过程如图 4.2 所示。

首先采用第二章内容选择先导节点，并读取先导节点实时和历史数据。采用第三章方法对先导节点负荷进行分时段计算，求出每日需要运行优化的时间段。

在离线模式下,若分好的时间段数为 N_{opt} 。则一次性进行 N_{opt} 次优化,以得到今后 24 小时内的所有优化控制策略,供运行人员参考。

步骤 1:在优化算法运行前,无功优化算法 ORPF(Optimal reactive power flow) 首先要从数据库 SWITCH 表中读取电网的各开关状态信息,以形成实时拓扑结构,进而构造网络节点和支路矩阵。ORPF 还要获得该区域电网的外网等值注入功率,以形成功率平衡方程。

步骤 2:给各控制变量设置初值。

步骤 3:由于该算法要得到今后 24 小时内的控制策略,因此要根据历史负荷数据预测 24 小时内的负荷变化情况。本课题中的负荷预测采用简单的三阶拟合方法实现,预测结果放入 MEASUREMENT VALUE 表中。ORPF 从中提取在各优化时段点时所对应的负荷数据,作为优化计算的当前数据。

步骤 4:ORPF 根据以上数据进行计算,得到各母线电压/相角及所有支路潮流,各节点电容器投入的容量以及各变压器分接头位置。并形成新的各受控节点的电压无功上下限定值。

步骤 5:以上步骤重复进行 N_{opt} 次,得到未来所有优化时段的控制策略,包括电网的潮流状态,变压器分接头位置,电容器投入的容量,以及各时段的电压无功上下限定值。

步骤 6:将步骤 5 的结果输出给运行人员。

4.1.4 在线优化模式

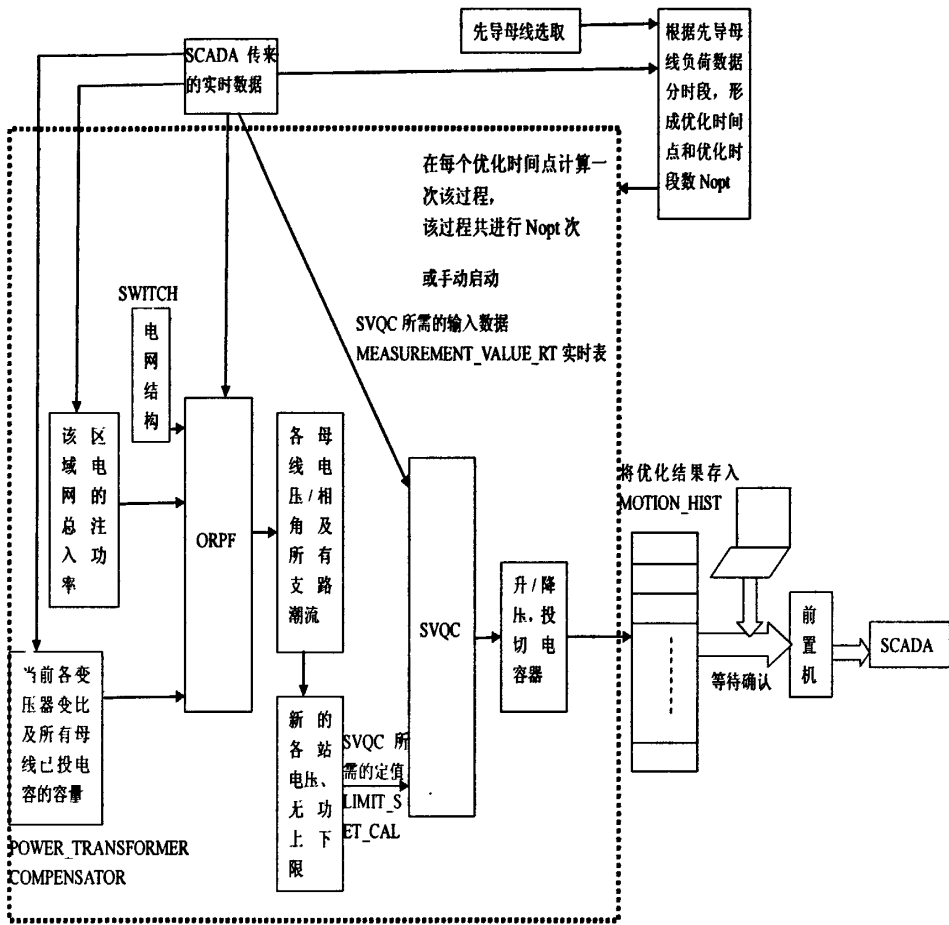


图 4.3 在线优化方案图

Fig. 4.3 The chart of online optimization scheme

功能：由控制系统在确定好的优化时段进行优化计算，并将优化计算得到的命令直接发布给各变电站控制器，或经运行人员确认后发布给各变电站控制器。优化过程如图 4.3 所示。

先导节点的选取和优化时段的选择与离线优化模式相同。控制系统在每个计算好的优化时段点启动一次优化计算，并将优化结果放入 MOTION_HIST 表中，供运行人员确认，并等待软 VQC 读取，送入前置计算机。

步骤 1: 无功优化算法 ORPF 首先要从数据库 SWITCH 表中读取电网的各开关状态信息，以形成实时拓扑结构，进而构造网络节点和支路矩阵。ORPF 还要获得该区域电网的外网等值注入功率，以形成功率平衡方程。

步骤 2: 各控制变量初值设置为当前各变压器变比及所有母线上已投入电容

器的容量。

步骤 3: 由前置通信服务模块从 SCADA 系统获取电网实时数据。

步骤 4: ORPF 根据以上数据进行计算, 得到各母线电压/相角及所有支路潮流, 各节点电容器投入的容量以及各变压器分接头位置。并形成新的各受控节点的电压无功上下限定值。

步骤 5: 以上步骤在每天的优化时间段点进行完成一次, 每天共运行 N_{opt} 次, 得到该优化时段的控制策略, 包括电网的潮流状态, 变压器分接头位置, 电容器投入的容量, 以及各时段的电压无功上下限定值。

步骤 6: 将步骤 5 的结果输出给运行人员, 得到确认后把命令发送给各变电站控制器。

4.2 Power CL 无功优化系统在某供电公司的运行情况

本文所述的无功优化系统已在多个地区运行。软件以 B/S/S 方式实现, 其中服务器负责优化计算、状态估计以及数据库服务。系统前置机负责与 SCADA 系统的数据交互。工作站用于向运行人员提供基于浏览器的档案录入、实时监测等界面。软 VQC 工作站负责运行集成多个软件 VQC 的程序, 代替硬件 VQC 实施无功电压控制。图 4.4~图 4.14 给出了本系统在某供电公司运行的界面截图和照片。

4.2.1 优化前电网状况

某电力公司 110KV 变电站章丘站及其沿线 10KV、35KV 变电站中的重要站点都安装有无功补偿装置 VQC。

该公司调度自动化系统采用积成 500 实现。

该公司在无功控制中存在以下问题:

► 补偿装置动作频繁。由于配电网早晚负荷波动较大, 导致电压经常运行在上下限范围边缘。由于不能及时根据负荷情况调节电压、无功定值, 使变压器分接头频繁动作, 补偿电容频繁投切, 降低了设备的使用寿命。

► 原有的 VQC 装置由于分散装设, 只能补偿装置所在站点的无功, 且各装置动作相互独立, 没有考虑到相互间的影响, 导致网损较高, 同时缺乏协调也导致

各站补偿动作更加频繁。

➤对电网的电压、无功情况缺乏有效而系统的实时监控,手动控制劳动强度大。

改造方案

4.2.2 改造方案

系统整体业务流程如下图所示。

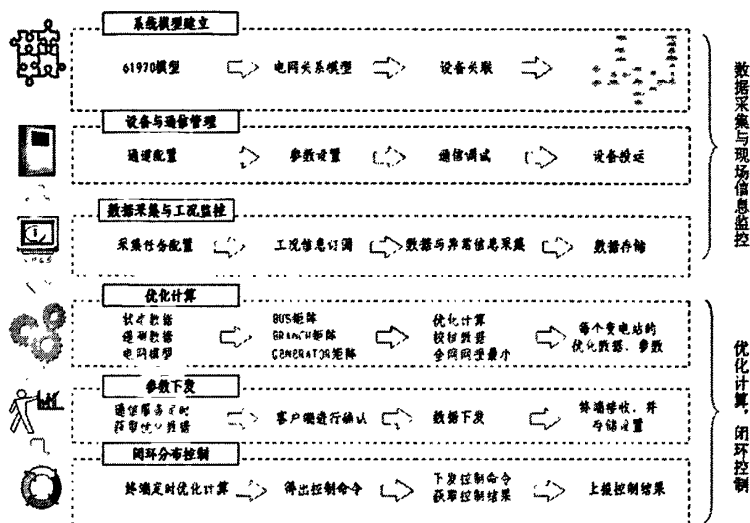


图 4.4 系统整体业务流程图

Fig. 4.4 The flow chart of overall business of the system

(1) 主站软件结构

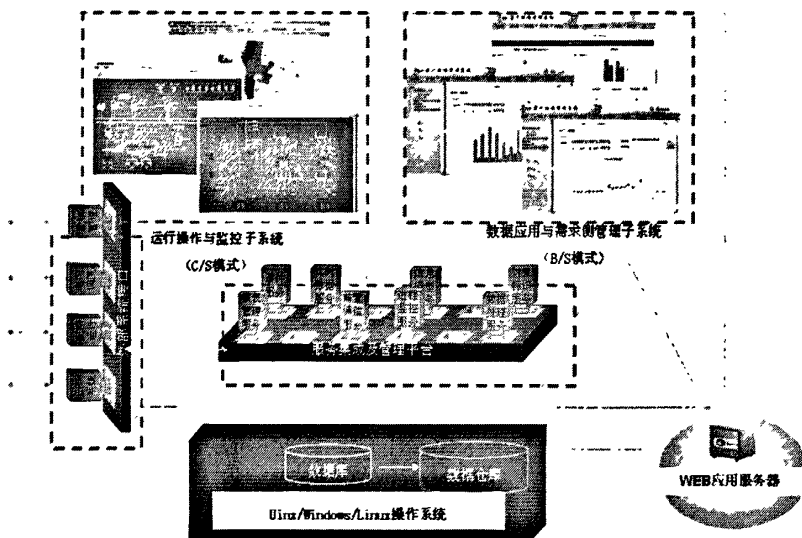


图 4.5 主站软件结构图

Fig. 4.5 The chart of the software of primary station

(2) 算法实现

在以上条件下,系统采用了定时优化的方式,于每日负荷波动较大的时间段,7:30-8:30, 11:30-12:30, 5:30-6:30各优化一次, VQC电压定值在10.1-10.8KV之间微调。考虑到该网电压偏高且缺少容性无功,本方案将功率因数确定为另一定值。计算后的功率因数在-0.98--1和0.95-1之间。

(3) 主站接口

可采用网络或串口的方式与SCADA系统接口。本方案采用采用网络方式从SCADA的中间库中读取电网数据,并将计算后得到的控制命令下发到中间库,供SCADA选择执行。

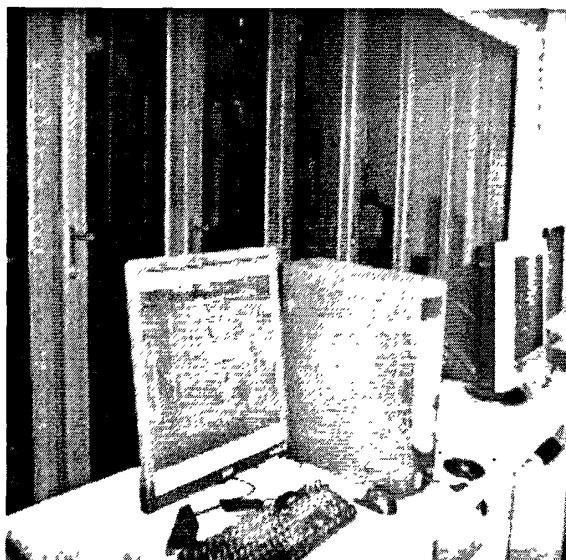


图 4.6 实际运行

Fig. 4.6 Actual operation

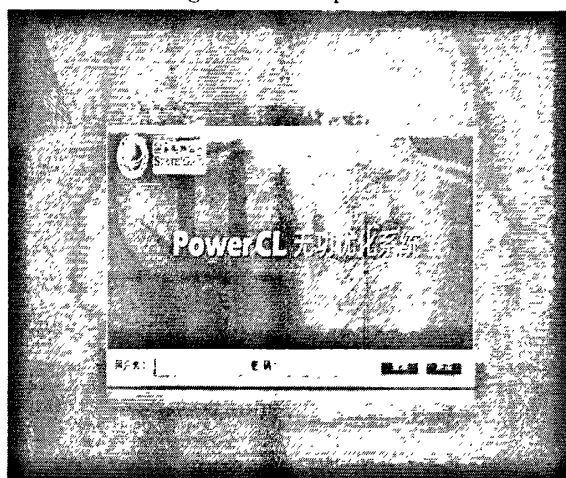


图 4.7 登陆界面

Fig. 4.7 Landing interface

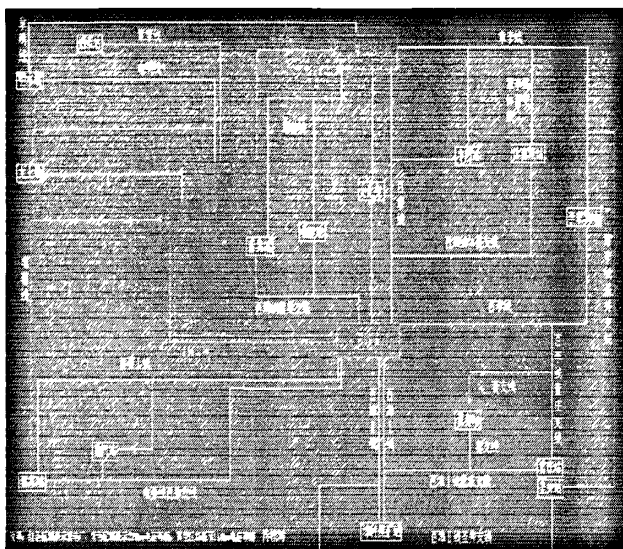


图 4.8 主站电网优化软件界面

Fig. 4.8 The interface of optimization software of primary station

电容量档案录入

电容量档案: 22

序号	电容量名称	变电站名称	电压等级	所属分段	开关位置	可调节范围	容量	投切	投切	投切
1	电容量#1	明水变电站	10KV	分段III	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
2	电容量#2	明水变电站	10KV	分段II	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
3	电容量#3	明水变电站	10KV	分段I	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
4	电容量#4	郭店变电站	10KV	分段I	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
5	电容量#5	郭店变电站	10KV	分段I	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
6	电容量#6	郭店变电站	10KV	分段II	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
7	电容量#7	郭店变电站	10KV	分段II	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
8	电容量#8	郭店变电站	10KV	分段I	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
9	电容量#9	郭店变电站	10KV	分段II	投入	可调节	容量	投切	投切	投切
10	电容量#10	郭店变电站	10KV	分段I	投入	可调节	容量	投切	投切	投切

123

图 4.9 控制变量-电容器档案录入

Fig. 4.9 The control variables-capacitor files entry

董丘供电公司 无功优化系统

变压器档案录入

变压器档案: 22

序号	变压器名称	变电站名称	电压等级	所属分段	开关位置	容量	投切	投切	投切
11	变压器#1	明水变电站	10KV	分段III	投入	容量	投切	投切	投切
12	变压器#2	明水变电站	10KV	分段II	投入	容量	投切	投切	投切
13	变压器#3	明水变电站	10KV	分段I	投入	容量	投切	投切	投切
14	变压器#4	郭店变电站	10KV	分段I	投入	容量	投切	投切	投切
15	变压器#5	郭店变电站	10KV	分段I	投入	容量	投切	投切	投切
16	变压器#6	郭店变电站	10KV	分段II	投入	容量	投切	投切	投切
17	变压器#7	郭店变电站	10KV	分段II	投入	容量	投切	投切	投切
18	变压器#8	郭店变电站	10KV	分段I	投入	容量	投切	投切	投切
19	变压器#9	郭店变电站	10KV	分段II	投入	容量	投切	投切	投切
20	变压器#10	郭店变电站	10KV	分段I	投入	容量	投切	投切	投切

1274

图 4.10 控制变量-变压器档案录入

Fig. 4.10 The control variables-transformer files entry

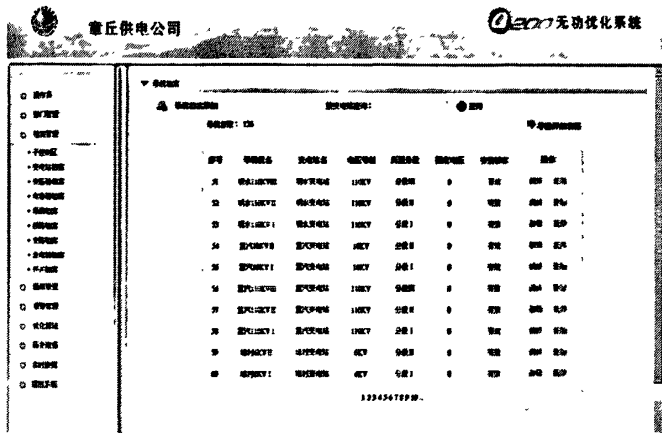


图 4.11 母线档案

Fig. 4.11 Bus files

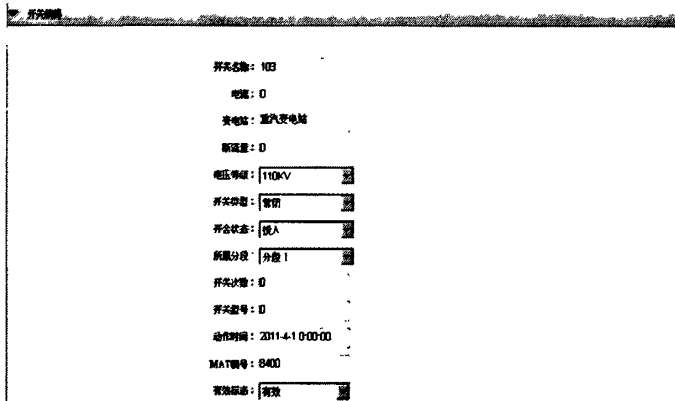


图 4.12 开关档案数据编辑

Fig. 4.12 The editing of switch files data

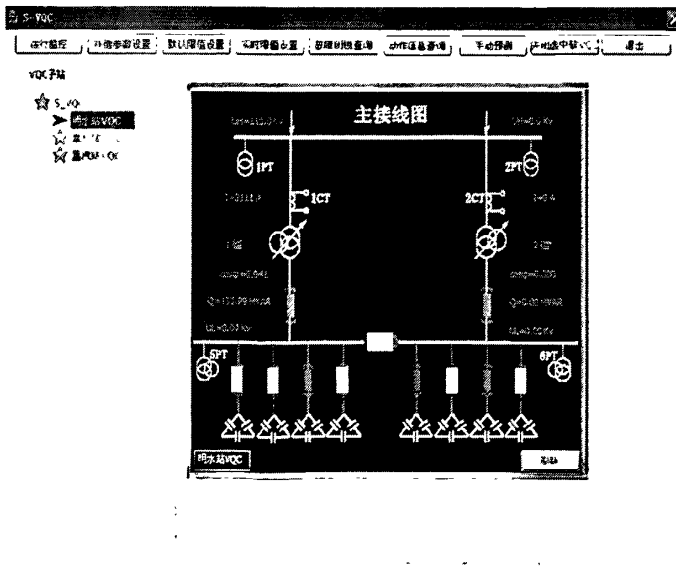


图 4.13 软 VQC

Fig. 4.13 Soft VQC

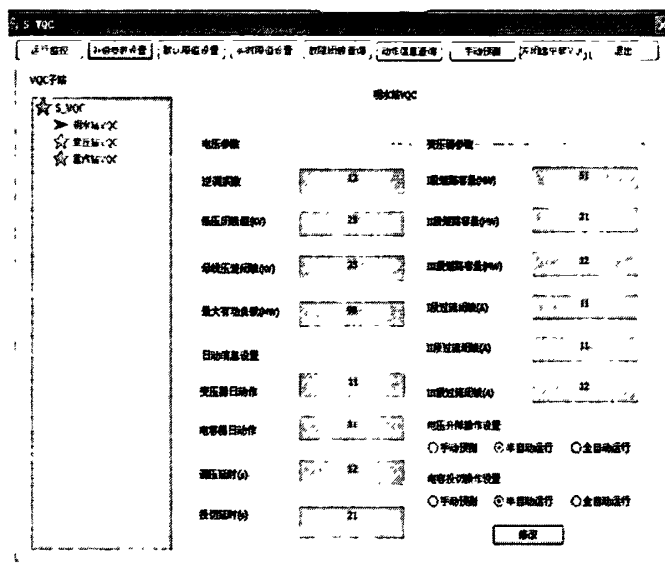


图 4.14 主站远程控制软件

Fig. 4.14 The software of remote control of primary station

4.2.3 安装本系统后对电网的改善

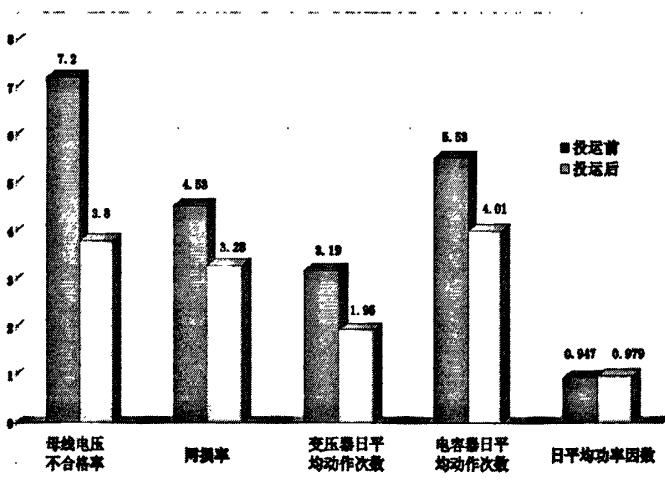


图 4.15 运行结果

Fig. 4.15 Operation results

运行实践表明,该控制系统运行稳定可靠,能明显提高区域电网110kV、35kV及10kV母线电压合格率、功率因数合格率。有效降低设备动作次数,实现降损节能,产生的经济效益和社会效益十分可观。

4.3 本章小结

本章详细介绍了本论文所提出的高可靠性变时段区域电网无功优化方法在

实际电网的实际应用，通过实践结果表明：该控制系统运行稳定可靠，有效降低设备动作次数，实现降损节能，产生的经济效益和社会效益十分可观。

第五章 结论与展望

5.1 结论

本文从电力系统无功优化的研究现状出发,提出了无功优化过程中需要解决的两大问题,详细介绍了现有先导节点选择方法,并详细介绍了传统无功优化解决方法及其缺陷。

针对如何确定优化时刻的问题,本论文提出了基于负荷多重分形特征参量变时段方法。负荷的变化每天都比较近似,但又不是周期性的变化,这种情况符合非线性动力学中的分形理论,以每天补偿设备的最大动作次数为目标,将一天24个时刻中多重分形特征参量类似的时段进行合并,从而得到合理的补偿时段,只在每个补偿时段进行一次优化,该方法大大减少了变压器或无功补偿装置的动作次数。

针对依据电网中哪个节点的负荷变化情况来确定全网优化时刻的问题,本论文提出了依据电网中先导节点的负荷变化情况来确定全网的优化时刻,先导节点能够代表全网的电压水平,与电网中其它节点有着密切的关系。

本论文以 MATLAB 为工具对提出的基于负荷多重分形特征参量变时段方法进行仿真,并将本论文所提出的选择先导节点方法和变时段方法应用到实际电网优化中。通过对仿真及实际应用结果进行分析,得出以下结论:

(1) 本论文利用潮流灵敏度矩阵选择得到先导节点,很好地解决了优化过程中各个节点的优化时刻无法实现相互协调的问题。

(2) 本文所提出的变时段方法所用的多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 能充分反映各个时刻电力负荷变化的波动程度。

(3) 通过分段结果可以看出:本文所提出的基于多重分形特征参量 $\Delta\alpha$ 变时段方法是有效的,实现了在每天负荷变化速度快时提高无功电压调节频率,而在负荷变化慢时降低调节频率,达到了既减少补偿设备动作次数。

(4) 通过将本论文所提出的高可靠性变时段区域电网无功优化方法应用到实际电网优化中可以看出:本论文所提出的方法在降低网损的情况下,大大减少了变压器和无功补偿装置的动作次数,很好地解决了无功优化中存在的问题。

5.2 展望

目前,利用分形理论对电力系统研究已经得到了关注,在接下来的发展过程中会更加得到关注,分形理论中更多、更好的方法会被更广泛地应用到电力系统研究中。尽管我们在电力系统研究中对分形理论已经得到共识,但是对电力系统的分形方面更加细节的理解还需要我们做出进一步的研究。

同时,本论文还存在一些不足之处:

第一,本论文所采用的负荷时间序列是通过实时数据得到的,是非平稳时间序列,并没有考虑影响负荷数据的谐波、噪声等不好的因素。在以后的研究中,可以考虑如何做出负荷的平稳时间序列。

第二,在将本论文所提出的变时段方法应用到电网实际优化过程中,采用的是“集中优化、分布控制”系统,在进行完优化后,不再直接控制无功补偿设备,而是将计算出的各个变电站补偿定值下发给VQC,VQC依据电压和无功的上下限定值进行在线自动调节变压器或无功补偿装置。电压或无功的限值大都是通过经验来确定定值的,在以后的工作中,依据不同补偿时段的负荷变化情况,可以选择一个合理的自动设定电压或无功上下限定值的方法。

参考文献

- [1]. Raymond R Shoults, Sun D T. Optimal power flow based upon P-Q decomposition[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(2):397-405.
- [2]. Mamandur K R C, Chenoweth R D. Optional control of reactive power flow for improvement in voltage profiles and for real power loss minimization[J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(7):636-645.
- [3]. 张鹏, 刘玉田. 配电系统电压控制和无功优化的简化动态规划法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(4):49-54.
- [4]. Liang R H, Cheng C K. Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4):625-630.
- [5]. Abdul-Rahman K H, Shahidepour S M, Daneshdoost M. AI approach to optimal VAR control with fuzzy reactive loads[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1):88-97.
- [6]. 文福栓, 韩祯祥. 人工神经网络模型的无功电源最优分布及经济调度[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3):20-28.
- [7]. Cheng S J, Malik O P, Hope G S. An expert system for voltage and reactive power control of a power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(4):1449-1455.
- [8]. HU S Y Y, HO K L. Voltage control using a combined integer Linear programming and a rule based approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2):744-751.
- [9]. Yokoyama R, Niimura T, Nakanishi Y. A coordinated control of voltage and reactive power by heuristic modeling and approximate reasoning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2):636-645.
- [10]. 丁晓群, 廖亨利, 周玲. 地区电网无功电压实时闭环控制软件[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21):66-67.
- [11]. Tomsovic K. A fuzzy linear programming approach to the reactive power/voltage control problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1):287-293.
- [12]. 宋军英, 刘涤尘, 陈允平. 电力系统模糊无功优化的建模及算法[J]. 电网技术, 2001, 25(3):22-25.
- [13]. 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9):1-4.
- [14]. 袁辉, 徐贵光, 周京阳. 基于模糊线性规划的无功电压优化[J]. 电网技术, 2003, 27(12):42-45.
- [15]. 王洪章, 熊信银, 吴耀武. 基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2002, 26(1):15-18.

- [16].周皓,周辉. 电网无功电压综合控制的改进 SA 算法[J]. 继电器, 2004, 32(1):24-27.
- [17].顾丹珍,徐瑞德. 一种地区电网多目标无功优化的新方法—改进模拟退火算法[J]. 电网技术, 1998, 22(1):71-74.
- [18].Liang R H, Wang Y S. Fuzzy-Based Reactive Power and Voltage Control in a Distribution System[J]. IEEE Trans on PD, 2003, 18(2):610-618.
- [19].Ponnambalam K, Quintana V H, Vannelli A. A fast algorithm for power system optimization problems using an interior point method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2):892-899.
- [20].Granville S. Optimal reactive dispatch through interior point methods[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1):136-142.
- [21].Liu M B, Tso S K, Cheng Y. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4):982-991.
- [22].刘明波,李健,吴捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9):1-7.
- [23].刘勇,康立山,陈毓屏. 非数值并行算法—遗传算法[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [24].陈国良,王煦炎,庄镇泉,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 1996.
- [25].张粒子,舒隽,林宪枢. 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):5-8.
- [26].雷德明. 利用混沌搜索全局最优解的一种混合遗传算法[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(12):81-82.
- [27].Ma J T, Lai L L. Application of genetic algorithm to optimal reactive power dispatch including voltage-dependent load models[J]. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1995, 16(4):5-10.
- [28].Wu Q H, Cao Y J, Wen J Y. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(8):563-569.
- [29].王志华,尹项根,李光熹. 伪并行遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(8):33-35.
- [30].潘哲龙,张伯明,孙宏斌. 分布计算的遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12):37-41.
- [31].张勇军,俞悦,任震. 实时环境下动态无功优化建模研究[J]. 电网技术, 2004, 28(12):12-15.
- [32].B.Sivakumar. A Chaotic approach to rainfall disaggregation[J]. Water Resources Research, 2001, 37(1):61-72.

- [33].周任军,段献忠,周晖.计及调控成本和次数的配电网无功优化策略[J].中国电机工程学报,2005,25(9):23-28.
- [34].张步涵,杨超,陶芬.基于两层遗传算法的多时段无功优化方法[J].电力自动化设备,2008,28(3):36-40.
- [35].Gavin J, Bowden Holger R, Maier, et al. Optimal division of data for neural network models in water resources application[J]. Water Resources Research, 2002, 38(2):1-11.
- [36].Al-Hamadi.H.M, Soliman.S.A. Short-term electric load forecasting based on Kalman filtering algorithm with moving window weather and load mode[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 68(1):47-59.
- [37].Kenji jinno, Shiguo Xu, Ronny berndtsson, et al. Minoru Matsumoto Prediction of Sunspots Using Reconstructed Chaotic System Equations[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(8):14773-14781.
- [38].方兴,郭志忠.配电网时变综合优化方法[J].电工技术学报,2006,21(9):31-36.
- [39].俞俊霞,房鑫炎.基于粒子群优化算法的动态无功优化[J].华东电力,2006,34(11):21-25.
- [40].王开鹏.电力系统二级电压控制的研究[D].北京:华北电力大学,2003.
- [41].肖军,刘天琪,苏鹏.基于双种群粒子群算法的分时段电力系统无功优化[J].电网技术,2009,33(8):72-77.
- [42].别朝红,周婷,王锡凡.电力系统多时段无功优化研究[J].西安交通大学学报,2008,42(6):698-702.
- [43].BIE Zhaohong, SONG Yonghua, WANG Xifan, et al. Integration of algorithmic and heuristic techniques for transition-optimised voltage and reactive power control[J]. IEE Proceedings: C Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(2):205-210.
- [44].李天云,刘自发,戴展波,等.电力系统负荷的分形特性研究[J].东北电力学院学报,1999,19(4):11-15.
- [45].梁平,樊福梅,吕玉坤.电力系统负荷分形预测及 R/S 分析[J].东北电力大学学报,2004,31(4):32-35.
- [46].李翔,乔艳芬.分形理论下的电力负荷特性分析[J].中国管理科学,2005,13(2):67-70.
- [47].沈晔华,马波,刘峰,等.基于分形理论的电力系统负荷特性研究[J].浙江电力,2007,13(2):15-17.
- [48].肖瑶.基于分形理论的电力短期负荷预测研究[D].湖南:中南大学,2007.
- [49].张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [50].张炜.电力系统分析[M].北京:中国水利水电出版社,1999.

- [51].关宏峰. 电力系统无功电压控制中电网分区的研究[D]. 辽宁:辽宁工学院, 2007.
- [52].孙元章, 王志芳, 姚小寅. 电力系统二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 1995, 23(9):9-14.
- [53].孙霞, 吴自勤, 黄均. 分形原理及应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2003.
- [54].封毅. 中国股票市场的分形特征分析[D]. 南京:南京财经大学, 2008.
- [55].黄怡蓉. 中国股市分形结构:理论与实证[M]. 广州:中山大学出版社, 2006.
- [56].黄超, 吴清烈, 武忠, 等. 基于方差波动多重分形特征的金融时间序列聚类[J]. 系统工程, 2006, 24(6):100-103.

致谢

本论文从选题到具体的研究仿真过程再到论文的撰写都是在导师程新功副教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。感谢程老师给我这样一个既有实用价值又与我将来的工作密切相关的课题，在整个研究过程中，程老师在无功优化这一领域的深入研究以及举一反三的启发式指导都给与我极大的帮助。伴随论文的完成，我收获的不仅仅是课题所涉及的知识，更多的是对电力系统感性、理性的双重认知以及发现问题并系统地分析问题的能力。与此同时，程老师严谨求实的科学态度、崇高的敬业精神深深感染了我。在此，谨向恩师程新功副教授致以崇高的敬意和衷心的感谢。

与此同时，我还要特别感谢宗西举老师及实验室全体同学：殷文月、张永峰、陈爱斌、张静亮等，他们以扎实的专业知识为我答疑解惑，给我最方便及时的指导及最有针对性的建议。感谢参考文献中提到的所有作者，他们先前做的大量工作是我进行研究的坚固基石，站在他们肩上，我才能看得更远。

看似漫长的三年学习生活即将结束，在这座校园里读过的每本书，经历过的每件事都将会成为我未来人生旅途中最美好的回忆。研究生三年的学习生涯，我不仅学会主动求知，更懂得了感恩知恩，明确了要以怎样的姿态去融入社会。感谢母校能够给我一个充实自我、展示自我的平台；感谢所有老师对我的谆谆教导；感谢同学们在学习和生活上对我的关怀与帮助；感谢实验室的战友们，他们对科研的那份专注于执着不断鞭策我、激励我，使我不断向前看；感谢校园里的一草一木，我失败时向我微笑，我成功时劝我谦虚。

最后，对评阅本论文的专家、教授及老师表示衷心的感谢。

2011年5月

附 录

一、在校期间发表的学术论文

- [1] Mei Li, Xin-gong Cheng, Xi-ju Zong. Studies on Divided-Period Reactive Power Optimization Based on Multi-Fractal Characteristic Parameter [C]. The International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, Zibo, 26-28 Nov. 2010: 312-315. (EI).
- [2] 李美, 程新功, 宗西举, 等. 变时段区域电网无功优化研究[C]. 中国电机工程学会电力系统专业委员会. 中国: 上海, 2010 年 10 月, 11-15.

二、在校期间参加的项目

2010 年 1 月—2010 年 12 月, 基于趋势预测的高可靠性变时段区域电网电压无功优化控制与电能质量综合管理系统, 国家电网科技项目。

三、在校期间获奖情况

2009 年 7 月, 研究成果: “基于电流电压预测的三相不平衡配电网 STATCOM 装置”被山东省人民政府学位委员会、山东省教育厅、山东省财政厅授予山东省研究生优秀科技成果创新奖三等奖。

2010 年 7 月, 研究成果: “非线性动力学在电力电子中的应用”被山东省人民政府学位委员会、山东省教育厅、山东省财政厅授予山东省研究生优秀科技成果创新奖三等奖。

