

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：吴国祿

日期：2011年6月10日

学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：吴国祿

日期：2011年6月10日

指导教师签名：孙国华

日期：2011年6月10日

摘 要

随着电力电子设备在配电网中的广泛应用,配电网的谐波畸变日益严重,危害电气设备的正常运行及电力系统的可靠性。对配电网的谐波成分进行准确的分析计算,掌握电网谐波畸变程度,合理进行谐波治理已经成为一项重要的研究课题。目前,无源滤波器由于具有结构简单、成本低廉、维护方便等优点,仍然是目前最为普遍的一种谐波治理手段。

首先,本文根据油田配电网自身的特点和谐波基本理论,研究了无源滤波器的基本结构和影响滤波性能的相关参数,通过分析电网谐波产生机理,建立了配电网中变压器、输电线路、负荷等元件在谐波条件下的运行模型和电网中谐波源的模型。利用基波潮流和谐波潮流的解耦性,采用基波潮流与谐波潮流分离迭代的方法计算电网中的谐波参数,对网络中谐波进行了分析。

其次,综合考虑经济指标、谐波抑制、安全运行等因素,建立了以滤波器投资费用为目标函数的优化配置模型。分析了模糊集中决策理论,采用基于模糊决策网络固有结构的方法确定滤波器的最佳安装位置。研究了粒子群算法及其改进算法,将其应用到配电网滤波器的优化配置中,编写了相应算法程序。

最后,以油田一条实际配电网线路为例进行验算,将结果与遗传算法的结果相比较,验证了本文算法和程序的正确性,得出相关结论。

关键词:谐波潮流;无源滤波器;优化配置;改进粒子群

Oilfield distribution network harmonic analysis and Passive Power filter optimization

Wu Guolu (Power system analysis and control)

Directed by Professor Liu Runhua

Abstract

With the widely use of power electronics equipment in the distribution network, some negative influences on harmonic distortion, normal operation of electrical equipment and reliability of power system, become increasingly obvious. It is an important research topic that accurate analysis and calculation of harmonic components of the distribution network, controlling the level of harmonic distortion and reasonable harmonic management. As the passive filter has some advantages such as simple structure, low cost and convenient maintain, it is still the most common means to control harmonic distortion at present.

Based on the characteristics of oilfield distribution network and the basic theory of harmonic, this paper has researched the basic structure of the passive filter and related parameters of the filtering performance. By analyzing the generation mechanism of harmonic, the paper has established the harmonic source model and the operation model, in which transformers, transmission line, the load and other components of the network operate in the conditions of the harmonic circumstance. Making use of decoupling of Fundamental power flow and harmonic power flow, the paper utilizes the method of separation and iterative for Fundamental and harmonic power in order to calculate the harmonic parameter and analyze the harmonic in the network.

Then in consideration of the economic indicators, harmonic suppression and the safe operation, the paper establishes optimal allocation model, which makes investment costs of the filter as the objective function. The paper analyzes the fuzzy sets decision-making theory, and a method based on the inherent structure of the network to determine the optimal installation location of the filter. Besides, the paper has researched the Particle Swarm Optimization and the Meliorated Particle Swarm Optimization, applied them to the filter optimization, and designed the corresponding algorithm program.

Finally, a practical example of oilfield distribution network is involved to check the design. By comparing the results of PSO and that of genetic algorithm we can verify the correctness of this algorithm and program and draw relevant conclusions.

Keywords: Harmonic power flow; Passive power filter; Optimization; Improved PSO

4.3 滤波器安装位置的确定.....	30
4.3.1 网络固有结构理论的原理.....	30
4.3.2 基于 ISTN 选择单次滤波器安装候选节点.....	31
4.3.3 模糊意见决策研究.....	32
4.3.4 基于模糊意见决策确定滤波器的最佳配置位置.....	32
4.4 粒子群算法研究.....	33
4.4.1 粒子群算法生物模型.....	33
4.4.2 粒子群算法的数学模型.....	33
4.4.3 粒子群算法的参数分析.....	34
4.4.4 粒子群算法的实现步骤.....	35
4.4.5 基于粒子群算法的配电网滤波器参数优化.....	35
4.4.6 粒子群算法的配电网滤波器参数优化.....	36
4.4.7 粒子群算法的配电网滤波器参数优化算法步骤.....	38
4.5 本章小结.....	39
第5章 算例分析.....	41
5.1 配电网参数信息.....	41
5.2 滤波器的配置结果与分析.....	43
5.3 设计方法比较.....	47
5.4 本章小结.....	49
总结与展望.....	50
1 总结.....	50
2 本文的创新点.....	50
3 展望.....	51
参考文献.....	52
附录 1.....	56
致谢.....	57

第1章 绪论

1.1 课题的背景和意义

随着经济的发展和人们生活水平的提高,电力电子技术的迅速发展,大量非线性设备应用于电网中。这些非线性设备在电网电压的作用下,使电网电流发生畸变,含有大量的谐波成分。谐波电流流入电网中,在系统阻抗上产生谐波电压,引起电网电压的畸变,从而造成电网系统的谐波污染,影响电能质量。

据统计,在国内有20%左右的电能是通过电力电子转换装置转换后给各种负载使用的。由于电力电子器件的日新月异,且容量不断增大、控制方式日趋复杂和使用数量的迅速增加等,其潜在的危害将越来越严重。同时,日常电器、各种整流设备和变频设备的使用越来越广泛,用户对使用的电压质量要求也越来越高。由谐波造成的各种故障和事故频繁发生,谐波危害已经引起了人们广泛的关注。谐波的危害主要表现在以下几个方面^{[1][13]}:

(1)使电网中的旋转电机、输电线路、变压器产生了附加损耗,使发电设备、输电线路、用电设备效率降低。在接有中性导线的线路中,较多的三次谐波电流经过中性线会使导线产生过热,严重时可能引起线路起火;

(2)影响电网中变压器、电机等设备的正常工作。谐波会增大变压器的铁磁损耗,使线圈内部出现局部过热,会导致旋转电机产生机械振动、噪声等危害,造成电容、电抗、电缆等元件发热、甚至烧毁;

(3)造成配电网的局部谐振,进一步使谐波放大,从而使(1)和(2)的危害大大增加。在电网中,通常装有进行无功补偿的电容器,电容容抗与系统频率成反比,而其在谐波情况下的容抗与基波作用下相比小很多,导致谐波电流畸变比谐波电压畸变大很多,尤其在发生谐振时,当谐波电压较小时,就会导致谐波电流较大,造成很高的过电压或过电流而烧毁设备,引发事故;

(4)导致继电保护装置误动作,引起保护装置失灵,如发电机的负序电流保护、母线的差动保护、主变压器的复合电压起动过电流保护等;

(5)影响测量仪表的精度,造成仪表测量误差。例如受谐波的影响,在电能测量时,若负载非谐波源,电网电压中含有谐波,则会在负载上产生谐波损耗,用户要多交电费,若用户为谐波源,向电网输出谐波有功功率,所付的电费比其所消耗的基波有功功率应

付的电费还少，测量结果不合理；

(6)网络中的谐波干扰邻近通信系统，引起通讯系统的噪声，降低通话的清晰度，干扰严重时会引起信号丢失，导致通讯系统不能正常工作。

综上所述，谐波已经成为电能质量的一个重要指标。有效合理的进行谐波抑制，将谐波畸变率限制在规定范围内，保证合格的电能质量，保持一个合格、稳定的电气环境，已经引起了更多的关注，对治理谐波问题的研究具有重要的理论和现实意义。

1.2 国内外研究现状

从国内外的研究情况看，对谐波问题的研究自从上个世纪六十年代初开始就一直相当活跃，内容涉及有关谐波的基本理论、谐波分析计算、谐波源特性、谐波的危害、谐波测量方法、谐波的抑制等多方面内容。从1980年左右开始，我国一些科研单位、生产部门和高等院校也陆续开展了谐波方面的研究工作，出现了很多研究成果，并于1993年制定出了谐波国家标准(GB/T14549-93)。

从目前所了解的情况看，国内研究谐波问题起步较晚，谐波分析基本上还是以高压为主。以配电网为研究对象，开发的谐波分析软件包进行谐波的分析 and 计算工作还较少。配电网谐波参数准确性和谐波参数分析是否全面都有待改善，使用起来很不方便，而目前价格较高。对电网谐波分析的主要难点是系统各元件的谐波模型、谐波源模型的研究和谐波潮流的研究。

滤波器的优化设计是在满足电网运行约束条件下，确定电网中各次无源滤波器的参数、组数和滤波器的位置。目前，国内外对滤波器优化设计方法作了很多的研究。传统的无源滤波器参数设计方法以工程经验法、非线性规划法为主，大多针对单一指标进行设计^[2]，例如，最小安装容量法，加权函数法，无功补偿容量法等。最小安装容量法以电容器的容量最小为目标，根据经验考虑滤波器的设计参数，不能满足滤波器设计时的投资指标、滤波器滤波性能、谐振放大等实际因素，此种方法没有对滤波器参数本质进行优化，对设计者的经验依赖很大，主观性强，设计的盲目性较大。加权函数法是对传统经验法的改进，该方法在设计时，首先确定几个重要参数重点考虑，通过模拟假设和近似，根据目标函数各部分的重要程度，确定加权值。在约束的条件下，将各个目标函数加权得到一个新目标函数。此时，设计滤波器参数的问题归结为带约束的目标函数极值问题。最后，通过数值分析方法如拉格朗日乘数法、龙格库塔迭代法求解。此种方法的各加权值的选取具有一定的主观性，假设的条件较多，寻优空间较小，导致寻优能力

不是很强。除了以上方法,目前研究和应用较多的还有启发式方法,这些方法主要包括遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、人工免疫算法、蚁群算法,以及这些算法的改进和一些混合算法,如混沌粒子群算法、模拟退火粒子群算法等。

1、遗传算法

遗传算法模拟自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型,是一种通过模拟自然界进化过程搜索最优解的方法。该算法的模型是将问题的解表示为“染色体”,为了在求解过程中达到改善解的目的,此算法通过“染色体”的评估、复制、组合、突变等步骤,不断进化,最终得到待求解问题的解。遗传算法较经典算法有很多优点^[3]:它不同于一般的微积分方法(如梯度下降法),因为它不需要其他信息,且不容易落入局部最小点,操作较为简单,而经典方法在计算时,需要计算目前位置在平面上不同方向的梯度,并向最大负梯度的方向移动,若平面是平滑且没有局部最小值时,此方法是可行的,而实际数据往往是多峰值,且可能具有很多局部最小点,遗传算法可以跳出局部最小点;此算法代表了潜在的解,而不是解本身,所以不必将问题模型完全理解,仅仅需要能过评估试验解的正确性即可。遗传算法也存在缺点:遗传算法的参数较多,包括种群大小、突变因子和交叉因子等,结合实际问题,关于参数的选取需要深入研究,其收敛特性可能收敛到局部最优,且容易陷入早熟,但此算法对目标函数的数学要求较宽,具有较强的鲁棒性,较多的应用于各种组合优化问题。

在文献[5]中考虑了电网所有节点谐波畸变最坏的情况,采用遗传算法对无源滤波器进行优化配置,通过最坏情况下的谐波电压畸变率最大的点确定无源滤波器的位置及容量,将网络的谐波电压畸变率限制在规定的范围内,到达谐波治理的目的。文献[6]采用基于非支配遗传算法(NSGA-II)求解无源滤波器参数的方法,通过建立谐波抑制和经济指标等多目标函数来综合优化滤波器参数,对NSGA-II的非支配排序算子、拥挤度比较算子和选择算子进行研究,设定两次技术效益选择进化,经济效益只参与一次非支配排序选择机制,根据遗传算法基本操作产生新的子代种群,保证种群中滤波效果较好的个体的进化速度。文献[7]在没有考虑各次谐波电压畸变率的约束,只考虑总谐波畸变率的情况下,采用基本的遗传算法对无源滤波器的参数和安装位置进行优化配置,而且主观确定无源滤波器的组数,没有给出确定方法,设计的参数可能并未达到最优。文献[8]亦是对遗传的算法进行改进,采用分级阶梯遗传算法对无源滤波器优化配置,建立了以安装的所有滤波器支路的容量之和最小为目标函数。在设计时,运用非线性规划的方法确定滤波器参数,而滤波器的位置则通过遗传算法来确定。文献[9]采用自适应遗传

算法,将滤波器安装于网络中的谐波源处,目标函数为网络中无源滤波器和有源滤波器总的费用,约束条件为网络中的谐波电压约束和滤波器安全运行约束,对无源和有源滤波器综合的进行优化配置。当网络中节点较多,谐波源较多时,算法的编码与谐波源个数成正比,占用内存较大,计算量相当大。

2、模拟退火算法

模拟退火算法来源于固体退火原理,是一种概率优化算法,将热力学的理论套用到统计学上。由于物质的退火过程与数学上的优化问题之间存在相似性,因此可以将求解的优化问题通过模拟退火来实现。模拟退火算法的具体过程为:物体在加热到一定温度,然后使物体的温度逐渐下降,通过控制温度下降的机制,对目标函数进行全局查找,可直接理解为在一个给定的温度从一个状态随机的变化到另一个状态,每一个状态到达的次数服从一个概率分布。计算过程简单,通用性强,鲁棒性强,适用于并行处理,可用于求解复杂的非线性优化问题。当温度很低时,以概率 1 停留在最优解。在退火过程中,如果搜到好的解则接受;否则,以一定的概率接受不好的解,从而实现多样化和变异的思想,达到跳出局部最优解的目的。然而,模拟退火算法也存在缺点,在算法的迭代过程中,一次只是随机地搜寻一点,如果目标函数为多峰值时,计算量非常大,这也限制了该算法在复杂寻优问题的应用,和其他算法混合使用的较多。此算法的参数也需要人工调整,如起始的温度、温度下降的方案、固定温度时的迭代长度和终止规则等。人为的因素有可能对计算结果造成很大差异,因此要通过大量的数值模拟计算,从而选择较好的参数搭配。

文献[10]采用模拟退火算法在多谐波源情况下搜索电网中谐波畸变最严重的节点,通过遗传算法进行滤波器的优化设计。

3、粒子群优化算法

粒子群算法是在模拟鸟群飞行觅食的行为时总结的仿生学算法。在进行优化问题求解时,将每一个可行解作为搜索空间中的一只“鸟”,在粒子群算法中称其为“粒子”,通过粒子之间的集体协作使群体达到最优。粒子在搜索空间中根据自身和同伴的飞行经验以一定的速度飞行,不断更新速度,并且根据一定的规则更新位置。粒子群算法没有遗传算法的“交叉”(Crossover)和“变异”(Mutation)操作,通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优。这种算法以其较实现容易、精度较高等优点引起了学术界的重视,并且在解决实际问题中展示了其优越性。粒子群算法与其他启发式算法相比,其收敛速度较快,一般来说,算法趋于收敛迭代次数为 30-80 次。

文献[11]采用粒子群优化算法对有源滤波器的各次注入谐波电流进行优化, 目标函数是有源滤波器的总费, 以电压谐波畸变率为约束条件, 将其限定在规定范围之内。实际应用时, 对于多谐波源的网络来说实现起来较为困难。文献[12]以电容器优化电容、电抗和电阻费用最小为目标函数, 考虑谐波电压畸变的约束条件, 运用粒子群优化算法, 求解电容器的容量。

4、人工免疫算法

人工免疫算法是在理论免疫学基础上发展起来的, 以生物免疫系统的功能、特点和作用机理为基础而设计出来的计算模型, 具有较强的学习、识别、记忆和特征提取的能力, 能够解决传统计算方法难以解决的复杂问题。该算法将变量看作是抗体, 在抗原进入体内以后, 抗原与抗体发生结合, 通过抗原与抗体之间亲和力的计算, 判断其是否超过一个提前的范围。当超过规定的范围时, 将克隆细胞进行突变, 生成与抗原跟亲和的抗体。此算法是从体细胞理论和网络理论得到启发, 实现了类似于生物免疫系统的抗原识别、细胞分化、记忆和自我调节的功能。如果将免疫算法与求解优化问题的一般搜索方法相比较, 那么抗原、抗体、抗原和抗体之间的亲和性分别对应的是待优化问题的目标函数、优化解、优化解与目标函数的匹配程度, 正是抗原与抗体之间不断的匹配, 不断进行亲和力的计算, 使目标函数逐渐接近最值, 潜在解趋近于最优解。

文献[13]以网络中各节点谐波电压和总谐波电压畸变率为约束条件, 综合考虑滤波器安全运行条件, 应用人工免疫算法对无源滤波器参数进行优化, 以使滤波器的费用最少。

此外, 还有一些方法是以上算法的改进或混合算法如增量式 PID 扩展粒子群算法、混沌模拟退火算法, 目前在电网滤波器优化配置中也有应用。文献[14]采用基于混沌模拟退火算法克服了单纯的混沌算法搜索速度慢的缺点。

1.3 无源滤波器应用现状

在谐波治理的方法中, 无源滤波器是出现较早的滤波装置。虽然在 20 世纪 70 年代, 一些文献里提出有源滤波器的思想, 目前也有了较大发展, 但无源滤波器仍是最主要的谐波治理手段, 是电网中应用最广泛的滤波装置。根据滤波器投入电压等级可以分为大型滤波器和中小型滤波器; 根据滤波器安装位置, 可以分为集中滤波和分散滤波, 其中集中滤波是指在变电站母线上安装较大容量的电容器, 可以降低网络损耗, 滤除谐波提高电压水平; 分散滤波是指在配电网中分散的装设滤波器, 用来滤除谐波, 提高网络的

功率因素,可视作负荷的一部分。另外,随着技术的发展,以无源和有源滤波器结合的混合型滤波器技术日益完善,促进了无源滤波器的应用。

1、无源滤波器广泛应用于直流高压输电工程^{[16][17]}。无源直流滤波器和无源交流滤波器,分别装在换流器的直流侧和交流侧,因为直流输电经常采用远距离大容量输电,换流变压器的直流侧输电电压能到几百千伏,母线短路容量可达几千兆瓦。按照电网等级分,应用于高压直流输电的属于大型滤波器。

2、无源滤波器常并联在电网的谐波源负荷处,用于滤除谐波电流,提高功率因数^{[18][19]}。应用于工业上的非线性负荷,通常采用装设无源滤波器就近抑制谐波的原则,以确保这些非线性负载的正常工作,同时减轻对电网的污染。

3、滤波器中的电容器组除了滤波的作用,还有无功补偿和电网调压的作用。在考虑谐波因素的情况下合理配置电容器参数(包括安装位置、安装组数、串联电抗器的电抗率等),不仅可以避免电容器造成谐振放大,甚至完全滤波的作用。

1.4 本文所做的主要工作

本论文以油田配电网为研究背景,在求解网络谐波潮流的基础上对电网的谐波进行分析,采用改进的粒子群算法完成配电网无源滤波器的优化配置,抑制网络的谐波,达到谐波治理的目的。主要做了以下工作:

1、研究总结了滤波器优化配置的国内外现状,分析了滤波器无源滤波器的基本结构和影响滤波其性能的相关参数。

2、分析了谐波产生机理,建立了系统中各元件的谐波等效模型及谐波源等效模型,采用前推回代方法求解基波潮流,根据基波潮流和谐波潮流的解耦性,将基波潮流和谐波潮流分离迭代,求解谐波潮流,以对网络的谐波畸变状况进行分析。

3、研究了模糊集中决策理论,采用基于模糊决策网络固有结构方法,确定滤波器最佳安装位置。建立了以滤波器的投资为目标的滤波器优化配置数学模型。采用改进粒子群算法对无源滤波器进行优化配置,引入遗传算法中复制的思想处理模型中的约束。

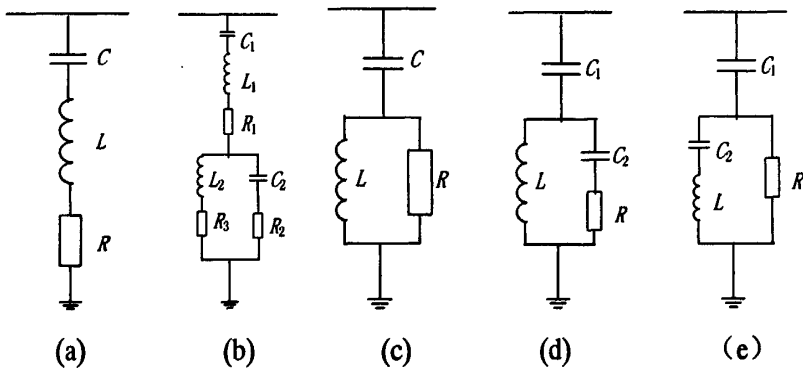
4、以一条油田配电网为算例,对本文算法和遗传算法进行比较,证明了滤波器参数的正确性。

第2章 无源电力滤波器的性能研究

在电网装设无源滤波器（PF）是抑制谐波的传统方法，仍然是应用最多的方法。本章分析滤波器的原理，进而为研究滤波器优化配置的数学模型作准备。

2.1 滤波器的类型

无源滤波器的元件包括滤波电容、电阻和电抗，其结构是由三者以适当参数组合而成，如图 2-1 所示。按照调谐次数和功能可将 PF 分为两类，一类是调谐滤波器，是指可以滤除某一次或某几次谐波的滤波器，因此调谐滤波器包括单调谐滤波器和双调谐滤波器两种，滤除的频率称为调谐滤波器的谐振频率；另一类是高通滤波器，是指当谐波频率高于某一频率时，此谐波及大于此频率的谐波大幅衰减，该频率称为高通滤波器的截止频率^[20]，按照其结构的不同将高通滤波器分为二阶高通滤波器、三阶高通滤波器和 C 型滤波器。在所有的滤波器中经常应用的有单调谐和高通滤波器两种形式^[21]，双调谐滤波器由于调谐较为困难，在实践中应用中较少。滤波器的原理是使需滤除的某次谐波频率和谐振频率相等，使谐波电流流经滤波器，以达到滤除谐波目的，各种滤波器有其各自的特点，以下做详细分析。



(a) 单调谐滤波器；(b) 双调谐滤波器；(c) 二阶高通滤波器；

(d) 三阶高通滤波器；(e) C 型滤波器

图 2-1 无源滤波器类型

Fig2-1 Type of passive filter

2.2 单调谐滤波器

调谐滤波器中，实际应用较多的是单调谐滤波器，运行中与谐波源并联，且可以将多组单调谐滤波器与一组高通滤波器配合使用。具体投入电网时，整套滤波器的连接方

式采用三角形或星形接线。但推荐使用图 2-1 (a) 的连接形式, 将滤波器电阻器和电抗器连接于电容器低压侧, 整套滤波器装置采用星形接法, 这种接法的优点在于:

- (1) 当任何一相中的某个电容被击穿时, 流过滤器支路的短路电流较小。
- (2) 滤波器中的电抗器不承受短路电流的冲击, 由于当网络发生单相接地时, 电抗器所承受的为相电压, 对绝缘等级要求不高, 仅采用半绝缘即可。
- (3) 便于不对称系统分相调谐。

当单调谐滤波器工作在基波条件时, 其感抗值 ωL 远小于容抗值 $\frac{1}{\omega C}$, 对于整个滤波装置来说, 其总体阻抗呈容性^[22]。由电感、电容的串联谐振原理可知滤波器对 n 次谐波的阻抗为

$$Z_{fn} = R + j \left(n\omega_1 L - \frac{1}{n\omega_1 C} \right) \quad (2-1)$$

式中: ω_1 为基波角频率, R 为单调谐滤波器中电阻。

根据以上公式可以得到滤波器整体阻抗—频率变化关系曲线如图 2-2 所示。

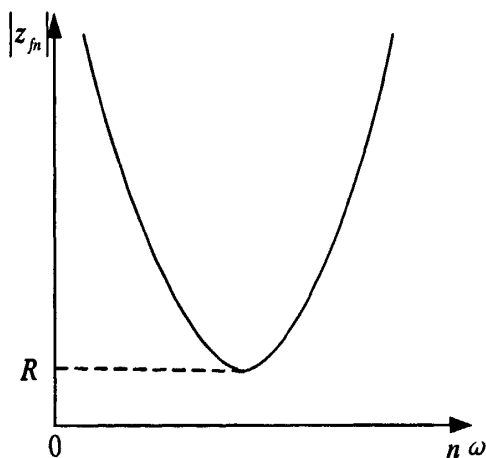


图 2-2 单调谐滤波器阻抗频率变化曲线

Fig2-2 The Single-tuned filter impedance frequency curve

在 n 次谐波下, 滤波器应满足:

$$X_{fn} = n\omega_1 L - \frac{1}{n\omega_1 C} = 0 \quad (2-2)$$

滤波器的谐振频率为

$$f = nf_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-3)$$

定义单调谐滤波器的品质因数为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (2-4)$$

式中： ω_0 为谐振频率。

则滤波器对 n 次谐波的阻抗可以写成，

$$\begin{aligned} Z_{fn} &= R \left[1 + j \left(\frac{n\omega_1 L}{R} - \frac{1}{n\omega_1 RC} \right) \right] \\ &= R \left[1 + j \left(\frac{n\omega_1 Q}{\omega_0} - \frac{\omega_0 Q}{n\omega_1} \right) \right] \\ &= R \left[1 + jQ \left(\frac{n\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{n\omega_1} \right) \right] \\ &= R \left[1 + jQ \left(\alpha - \frac{1}{\alpha} \right) \right] \end{aligned} \quad (2-5)$$

其中 $\alpha = \frac{n\omega_1}{\omega_0}$ 。

由上式中可以看出，单调谐滤波器的阻抗与滤波器品质因数 Q 、参数 α 以及回路阻抗 R 有关，其中品质因数 Q 对滤波器的对频率的选择行影响很大，随着品质因数的增大，阻抗也增大，对频率选择性越好。

就单调谐滤波器来说，其基波阻抗值的大小会影响无功功率补偿的大小，若滤波器对基波的阻抗小，对网络的无功补偿就多，从式（2-5）可以看出，单调谐滤波器的基波阻抗与品质因数成正比，即当品质因数较大时，滤波器的无功补偿能力较强。因为品质因数决定了网络的谐振频率谐波的滤波效果，所以无法通过减小阻抗来得到较小的品质因数，同时 L 与 C 的乘积不变，因此，一般通过取较大的电容和较小的电感来获得较小的 Q ，实际上， $\alpha < 1$ 时滤波器等效为一个电容，电容越大，无功补偿能力越强。滤波器的无功补偿能力要符合实际要求，若电容器值过大，会引起无功补偿过补，但是，当电感量过小时，又会容易引起滤波器支路与网络发生局部谐振。当参数 α 值为 1 时，由公式（2-5）可得 $Z_{fn}=R$ ，因为 R 较小， n 次谐波电流主要由 R 分流，很少流入网络。

2.3 高通滤波器

如图 2-1 中 (c)、(d)、(e) 所示的分别为二阶高通滤波器、三阶高通滤波器和 C

型高通滤波器，各种类型的高通滤波器有各自的优缺点。各种滤类型的高通滤波器由于各自的性能的不同，应用范围和使用场合也有所不同。通常单从滤波性能来说，最好的是二阶高通滤波器，因为其损耗较小，在实际中应用较多。就滤波器的损耗方面考虑，三阶高通滤波器的最小，因为其结构中多了一个电容，但此电容与串联支路上的电容比起来小得多，此电容的作用提高了滤波器对基波频率的阻抗，减少了基波损耗。C型高通滤波器性能介于二阶和三阶之间。因为C与L对基波串联谐振，所以大大减少基波损耗，但其缺点也较为明显，元件参数飘移可能使导致滤波器发生谐振，因此限制了其广泛应用。

鉴于对各种高通滤波器的利弊比较，在工程中二阶高通滤波器是最常用的，下面的讨论都对于二阶高通滤波器，主要分析它的性能与影响参数。

在二阶高通滤波器中，因为电感L与电阻R并联，因此，随着频率的增大，并联部分呈现的阻抗值不可能超过R值，滤波器的频率—阻抗特性表现为一个低阻范围，和单调谐滤波器不同，高通滤波器是对一个频率范围起滤除作用。在频率低于某一频率的情况下，滤波器的阻抗迅速增加，即滤波器呈现为高阻状态，此频率定义为截止频率。在频率高于某一频率的情况下，滤波器呈现为低阻状态，图2-3所示为高通滤波器阻抗—频率曲线。

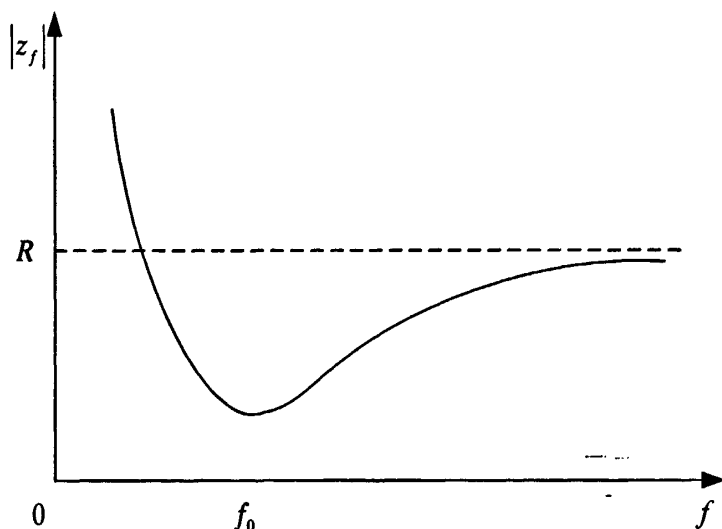


图 2-3 高通滤波器阻抗频率曲线

Fig2-3 High-pass filter impedance frequency curve

在滤波器的优化配置时，需要计算高通滤波器的参数，其主要参数有：

1、截止频率

高通滤波器的截止频率 f_0 由下式确定：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR} \quad (2-6)$$

其对应的滤除谐波次数为：

$$n_0 = \frac{f_0}{f_1} = \frac{1}{2\pi f_1 CR} = \frac{X_c}{R} \quad (2-7)$$

其中 X_c 为电容器基波时的电抗。

2、高通滤波器阻抗由下式确定：

$$Z_f = \frac{1}{j\omega L} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (2-8)$$

为确定和计算有关参数方便，引用参数 m ，

$$m = \frac{L}{R^2 C} \quad (2-9)$$

则式（2-8）可以化为如下形式：

$$Z_f = \frac{m^2 n^2 R}{m^2 n^2 + n_0^2} \left\{ 1 - j \left[\frac{n_0}{mn} - \frac{(m^2 n^2 + n_0^2) n_0}{m^2 n^2} \right] \right\} \quad (2-10)$$

有上式可得阻抗的最小值 Z_{min} 时的 n 值，设为 n_m ，则

$$n_m = n_0 \sqrt{\frac{m + \sqrt{1 + 2m}}{m(1 + 2m - m^2)}} \quad (2-11)$$

根据公式（2-11）可知，无论 m 如何变化， n_m 总是大于 n_0 的， n_0 和 n_m 的值根据以下原则选取： n_0 的值选取应高于目前网络中的单调谐滤波器的阶数，其目的是防止较多的谐波电流流过高通滤波器，影响单调谐的滤波效果， n_m 值的选择根据需滤除的谐波次数。因为流入滤波器的电流受到 m 值的影响，从而影响电容器的容量，即影响整个滤波器的容量。在选定 n_0 、 n_m 后， m 的值可以由公式（2-10）计算得到。

3、品质因数

高通滤波器的参数 m 对高通滤波器设计非常重要，其值也会影响滤波器品质因数，和单调谐类似，将其品质因数定义为：

$$q = \frac{R}{X_{L_n}} = \frac{R}{nX_{L1}} = \frac{n_0}{mn} \quad (2-12)$$

式中 q 的值与 n 有关，为确定起见，和单调谐滤波器一样，定义当 n 满足 $X_{L_n} = X_{C_n}$

时, q 值为高通滤波器的品质因数 q_n , 故 $q_n = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$, 由公式 (2-8) 得,

$$q_n = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (2-13)$$

不同的 m 值会对高通滤波器的阻抗频率特性产生影响, 工程中参数 m 的值通常在 0.5-2 内取, 所以 q_n 的值通常为 0.8-1.4。

2.4 无源滤波器的设计原则

无源滤波器的结构、参数并不是唯一的, 在设计时既要考虑技术要求, 包括滤波器工艺、滤波器结构是否合理等, 又要考虑谐波治理效果以及网络的无功补偿, 同时更要兼顾经济因素。因此, 无源滤波器的设计应满足的原则主要有:

- 1、PF 的电容、电感、电阻之间应符合串并联谐振要求。
- 2、滤波器的阻抗不能与网络的阻抗发生串并联谐振。
- 3、装设无源滤波器后, 网络的谐波畸变率应满足国标 (GB/T14549-93)。
- 4、在计算无源滤波器谐波容量时, 除了要考虑滤波器本身需滤除的谐波容量, 还要考虑至少增加 10% 的谐波容量, 即在计算得到的滤波器谐波容量后, 将其乘大于 1.1 的系数, 如果不考虑增加谐波容量, 由于网络中谐波源的工作情况是变化的, 无源滤波器易发生过载。
- 5、避免各无源滤波器之间并联谐振。
- 6、各次单调谐滤波器的 Q 值尽可能相等^[23]。

2.5 本章小结

本章介绍了无源滤波器的类型, 分析了单调谐滤波器和高通滤波器的结构、原理、模型, 并且给出了频率阻抗特性。研究了影响滤波器性能的参数, 包括其品质因数、截止频率, 最后分析了无源滤波器设计的一般性原则。以上的分析为下一步滤波器的优化配置提供了理论基础和知识准备。

第3章 配电网谐波分析计算

配电网谐波分析的主要内容之一是谐波的潮流计算,谐波潮流计算的过程就是对配电网谐波计算分析的过程,它为电力部门进行谐波分析、谐波治理提供重要的依据。本章是滤波器优化配置的基础,其计算的准确性将直接影响滤波器优化配置的结果。

3.1 配电网的潮流计算

3.1.1 配电网的潮流计算简介

配电网的潮流计算包括基波潮流计算和谐波潮流计算两部分。基波潮流分布是由供电端向用电端流动,而谐波潮流正好相反,其始端是电流为非正弦波的用电和变电设备即谐波源,对于油田配电网而言主要是变频器、电力变压器,末端是供电端和其他用电设备。谐波潮流本质上是基波潮流在非线性元件上转换产生的,其流向是由用电端流向供电端。基波潮流计算的考察对象是电网中的基波电流,基波电压以及功率,谐波潮流计算的考察对象是电网中各节点的谐波电压,谐波电流、电压畸变率等,从而判断配电网的谐波畸变情况是否符合国家标准,为配电网的谐波治理提供依据。

3.1.2 配电网潮流计算特点

配电网基波潮流计算是网络重构、故障处理、电网谐波分析等的基础和数据来源^[24]。配电网潮流计算的模型可以描述为:已知量为各节点的负荷,电源点电压,配电网拓扑结构和各支路的阻抗,求解线路的各节点电压和各支路功率。近年来出现了许多计算配电网潮流的算法,主要有前推回代算法、回路阻抗法、改进牛顿拉夫逊迭代法等。

电力系统基波潮流计算的研究从20世纪50年代就开始,从最早使用的高斯—赛德尔迭代法到牛顿—拉夫逊法(N-R),进而到经过牛顿—拉夫逊法派生的PQ分解法,已成为十分有效的潮流计算方法。配电网与输电网相比,它们在网络结构上存在明显的差别^[24],主要有四个方面:

1、6~10kV的中压配电网的拓扑结构大部分为辐射状网络,有时为了继电保护装置和自动检测装置对于故障的定位,也将网络设计为环状,但在通常情况下配电网是运行在开环状态下,只有当发生故障时才有可能出现环网运行的情况。因为这种辐射状的结构,变压器二次侧发出的功率是单向的,网络的潮流分布是完全确定,辐射状配电网潮流计算的解是唯一解^[25]。而输电网络多为环网结构,其潮流分布可能存在多解的情况;

2、配电网线路与输电网线路相比，线路的直径较细，导致配电网支路的电阻电抗比较大，一般不满足 $R \ll X$ ，此特点使 jacobian 矩阵对角优势受到破坏，条件数增大，因此采用输电网中常用的 P-Q 解耦法来计算配电网潮流分布时会发生难以收敛的情况；

3、配电网的各支路长度较短，在油田配电网中更是如此，且电压等级较低，线路的分布参数很小，可以略去对地的电导、电纳；

4、配电网支路数一定小于节点数，故网络节点导纳矩阵稀疏程度很高。

3.2 配电网基波潮流计算方法

3.2.1 潮流算法节点编号方案的比较与选择

节点编号方案在配电网系统潮流分析，配电网系统状态估计等方面都有重要的应用。配电网潮流算法根据采用的系统状态变量的不同，可分为节点法和支路法。不同类型的潮流分析方法适合采用不同的节点编号方案。

1.适用于节点法潮流分析的编号方案

由于配电网具有辐射状结构的特点，使得节点编号方案只要满足一定的条件就可以实现导纳矩阵 LU 分解时注入元素的数目为 0。如果在配电网系统的节点导纳矩阵中，节点的排列不满足一定的规律，则构成的节点导纳矩阵也无规律可循。若排列时遵循子节点总排在父节点之前或子节点总排在父节点之后的排列规律，则所形成的节点导纳矩阵的因子表与节点导纳矩阵具有相同的稀疏结构，因而该因子表可以直接由节点导纳矩阵写出。满足这一要求的节点编号方案很多，常用的有两种：基于节点分层的广度优先搜索逆序编号和深度优先搜索的前序遍历顺序编号^[26]。

2.适用于支路法潮流分析的编号方案

(1) 适用于回路阻抗法的潮流编号方案

若将配电网各负荷节点的负荷用阻抗表示，从馈线根节点到每一个负荷节点形成一条回路，以回路电流为变量，由基尔霍夫电压定律，可列出如式 (3-1) 所示的回路电压方程：

$$U_s = Z_L I_L \quad (3-1)$$

其中， U_s 为回路电压向量列向量， Z_L 为回路阻抗矩阵， I_L 为回路电流列向量。

回路阻抗矩阵根据电力系统中的定义可知， Z_L 是一个 $n_L \cdot n_L$ 维全为非零元素的方

阵。在公式 (3-1) 中，支路的自阻抗用 Z_{ii} 来表示，其值等于节点 i 与根节点 S 之间的支路阻抗和，再加上节点 i 的负荷阻抗；支路的互阻抗用 Z_{ij} 来表示， Z_{ij} 就等于节点 i 与节点 j 到根节点的共同支路阻抗和。

由于导纳矩阵中的自阻抗和互阻抗的存在，许多元素是相同的，不同的元素个数等于网络支路的数目。当采用通常的编号方法时，矩阵中的不同元素排列没有特定的规律。为了提高运算效率，可以采用“稀疏存储”方法，具体操作是：将与某一回路具有相同公共支路的所有回路放在一起，连续的编号，则形成的回路阻抗矩阵 Z_L ，对 Z_L 进行三角分解，使上三角矩阵 U 中的元素能够有规律的排列，许多相同的元素集中排列在一起，只存储其中不同的元素。

(2) 适用于前推回代类潮流计算的编号方案

适合于前推回代类潮流计算的编号方案的是分层编号法，相对于稀疏矩阵法，分层编号方法较为直观，在配电网潮流计算中应用较多，而且易于编程^[26]，按照节点和支路的不同此方法可以分为节点分层编号法和分支线分层编号法。尽管采用分支线分层编号方法比节点分层编号方案看起来繁琐，但可以使系统方程和变量的数目与分支数目而不是母线数目相关，缩小网络的规模。

本文采用深度优先搜索的前序遍历顺序按接点分层的编号方法，首先选网络的一条主线为第一层，所有和主线相连的支路记为第二层，再将支路线作为主线，依次寻找以下的支路，作为第三层，不断查找下去，标记相应层数。深度优先搜索的前序遍历顺序的搜索过程为：设 x 是当前被访问的顶点，对 x 访问过后，就对 x 做好标记，选择从 x 出发的未检测过的边 (x, y) 。如果是已访问过的 y ，则重新选择一条从 x 出发未检测过的边，否则沿着边 (x, y) 到达未访问过的 y ，对 y 进行访问并将其做好标记；然后从 y 开始搜索，直到搜索完从 y 出发的所有边^[27]，及访问完所有从 y 出发可达的顶点之后，才回到顶点 x ，再选择一条从 x 出发未检测的边。将与 x 相连所有边都遍历一遍即结束。此时，若 x 不是源点，则回到 x 之前访问过的顶点；否则网络中所有和源节点有路径相通的顶点（从源节点可达的所有顶点）都已经被访问过，若网络图连通，则遍历结束，否则继续选择一个尚未被访问的顶点作为新源节点，进行搜索^[27]。按深度优先搜索的前序遍历顺序 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10，编号结果为如图 3-1 所示。

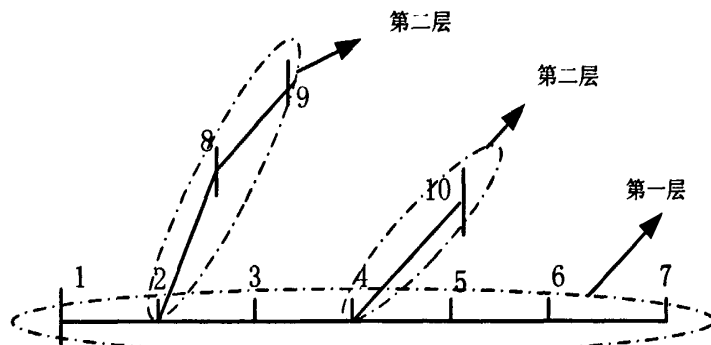


图 3-1 深度优先搜索的前序遍历顺序按接点分层的编号方法示意图

Fig3-1 Pre-order depth-first search traversal sequence numbering according to hierarchical diagram of contacts

3.2.2 基波潮流计算

对网络进行节点编号，根据建模形成网络的导纳矩阵后，首先进行基波潮流计算，然后根据基波潮流计算的结果和所建立的配电网谐波潮流模型，进行谐波潮流计算。适合于配电网的潮流计算的有节点功率法、节点电流法、支路电流法、支路功率法，本文采用前推回代法。

基波潮流计算采用适合于配电网的前推回代法^[27]，属于支路电流法：对于如图 3-2 所示只有一个电源，有 N 个节点的配电网。

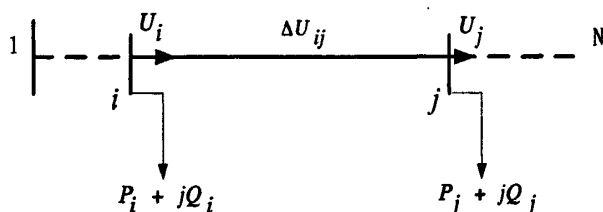


图 3-2 简单配电网线路

Fig3-2 Simple distribution network

1. 常规支路电流法的计算步骤

(1) 初始化所有负荷点电压， $\underline{U}_{1(0)} = \underline{U}_{2(0)} = \dots = \underline{U}_{N(0)} = U_{Pi}$ ，所赋初值为额定电压 120。

(2) 从网络叶子节点开始计算负荷电流 $\hat{I}_d^{(0)}$ ，接地电流 $\hat{I}_g^{(0)}$ 。计算公式为：

$$\hat{I}_{di}^{(0)} = \frac{\hat{S}_i}{\hat{U}_i^{(0)}} \quad (3-2)$$

$$i_{gi}^{(0)} = \frac{\dot{U}_i^{(0)}}{Z_{gi}} = \dot{U}_i^{(0)} Y_{gi} \quad (3-3)$$

式中， S_i 为叶子节点*i*所带负荷， $U_i^{(0)}$ 为节点*i*的电压。 Y_{gi} 为有接地支路时的等效接地支路导纳，接地支路通常包括变压器支路、电抗器、电容器支路等。此时，以该节点为末端节点的支路电流为：

$$i_{ij}^{(0)} = i_{di}^{(0)} + i_{gi}^{(0)} = \frac{\hat{S}_i}{\hat{U}_i^{(0)}} + \dot{U}_i^{(0)} Y_{gi} \quad (3-4)$$

(3) 对于中间节点*i*，以该节点为末端节点的支路电流等于流出该节点的所有支路电流之和，加上该中间节点的负荷电流以及接地电流。计算如下：

$$i_{ij}^{(0)} = i_{di}^{(0)} + i_{gi}^{(0)} + \sum i_{ik}^{(0)} \quad (3-5)$$

式中， $\sum i_{ik}^{(0)}$ 为流出节点*i*的所有支路电流和。

(4) 由(1)、(2)可以得到网络中所有支路流过的电流，此为前推过程。根据已知根节点的电压从前向后求得各负荷节点的电压 $\dot{U}_i^{(1)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$)，此为回代过程，计算如下：

$$\dot{U}_i^{(1)} = \dot{U}_j^{(1)} - i_{ij}^{(0)} Z_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-6)$$

式中， j 为*i*的上级节点， Z_{ij} 为支路阻抗。

(5) 计算各节点电压幅值修正量 $\Delta U_i^{(1)}$ ，并计算本次迭代中电压幅值修正量的最大值 $\max \Delta U_i^{(1)}$ 。

(6) 根据迭代终止条件 $\max \Delta U_i^{(1)} < \varepsilon$ 进行判断，如果满足终止条件则潮流收敛，否则转到步骤1。

(7) 根据得到的各节点电压，计算线路的功率、网损。

2. 对支路电流法进行改进

保持前推过程不变，对回代过程做如下改动：

(1) 计算各支路始端*j*向下级输送的功率 $S'_{ij}^{(0)}$ ，计算如下：

$$S'_{ij}^{(0)} = S_{di} + S_{gi} + (i_{ij}^{(0)})^2 \times Z_{ij} + \sum_{k \in \mathcal{E}} S_{ik}^{(0)} \quad (3-7)$$

式中， S_{di} 为支路末端节点*i*的负荷功率， S_{gi} 为支路末端节点*i*流向接地支路的功率，

$(I_{ij}^{(0)})^2 \times Z_{ij}$ 为支路线损, $\sum_{k \in K} S_{ik}^{(0)}$ 为流出末端节点的功率之和。

(2) 利用支路首端功率计算新的支路电流 $I_{ij}'^{(0)}$, 计算如下:

$$I_{ij}'^{(0)} = \frac{S_{ij}'^{(0)}}{U_j'^{(0)}} \quad (3-8)$$

式中, $U_j'^{(0)}$ 为支路首端节点电压值, 此时的电压值已经经过了一次迭代。

(3) 利用修正电流进行回代过程, 计算支路末端电压, 计算如下:

$$U_i^{(1)} = U_j^{(1)} - I_{ij}'^{(0)} Z_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3-9)$$

比较 $I_{ij}'^{(0)}$ 与 $I_{ij}^{(0)}$ 的区别可以发现, $I_{ij}^{(0)}$ 的计算利用了给定节点电压初值、负荷注入功率、接地导纳功率。 $I_{ij}'^{(0)}$ 的计算利用了经过一次迭代后的电压值、首端流动功率。因为根节点位于馈线首端, 而电压的回代过程是由前往后进行的, 因此对任意一条支路, 总是先得到首端电压, 后得到末端电压。这样经过电流的修正以后, 可将刚刚迭代得到的新的首端节点电压值代入计算电流值, 进而推算末端节点电压。

3.3 配电网的谐波潮流计算

3.3.1 配电网谐波潮流机理

配电网谐波潮流与基波潮流不同, 从能量转化的角度分析网络中谐波产生的机理, 是谐波潮流计算的前提工作, 为谐波源模型的建立提供理论指导^[28]。谐波在电网中的分布情况可以用下面的简化电路图 3-3 和图 3-4 来说明。

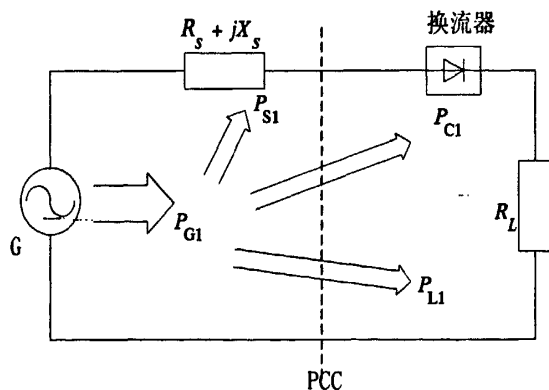


图 3-3 基波潮流流向示意图

Fig3-3 Fundamental power flow diagram

其中,发电机G是电压源,它经由网络阻抗 $R_s + jX_s$ 向通过带有电力电子装置的负荷 R_L 提供功率。网络的基波功率 P_{G1} 由发电机G发出,扣除系统阻抗消耗的一小部分功率,经公共连接点PCC,大部分传送到负载端 P_{L1} ,另外的小部分基波功率 P_{C1} 流入换流装置[29][30],根据功率平衡有:

$$P_{G1} = P_{S1} + P_{L1} + P_{C1} \quad (3-10)$$

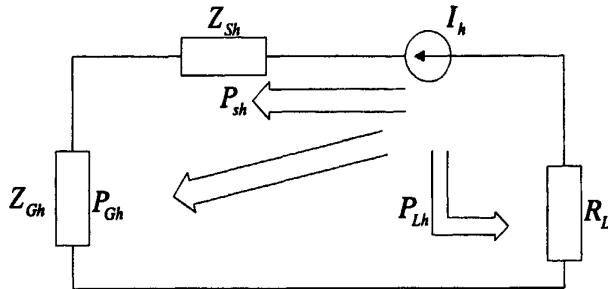


图 3-4 谐波潮流流向示意图

Fig3-4 Harmonic power flow diagram

非线性的电力电子装置在谐波潮流中的本质是向网络发出谐波的,将基波功率 P_{C1} 转换为谐波功率,分别向网络阻抗、发电机和负荷送入值为 P_{Sh} , P_{Gh} 和 P_{Lh} 的谐波功率,可得:

$$P_{C1} = P_{Sh} + P_{Lh} + P_{Gh} \quad (3-11)$$

电力电子装置从网络中吸收部分基波功率转化为谐波功率,理论上网络中的谐波功率应在基波功率计算中得到平衡,网络的总功率损耗为基波功率损耗 P_{S1} 和谐波功率损耗 $P_{Sh} + P_{Gh}$ 之和。由图 3-3、图 3-4 可以看出,在基波网络中,发电机看作是谐波电压源,换流装置为非线性负载;在谐波网络中,发电机看作是谐波阻抗,换流装置为谐波电流源,谐波潮流和基波潮流的流向是相反的。另外,电网中各元件的参数因频率的不同而有很大的差别。

3.3.2 配电网各元件谐波潮流的等效模型

配电网各元件谐波潮流的等效模型与在基波情况下的相比,有很大不同。在进行谐波潮流计算时,只有正确的建立谐波等效模型,才能确保谐波分析结果的准确性和可靠性。

1、输电线路

输电线路在潮流计算中通常用集中参数的等值Π型电路来表示,是具有均匀分布参数的电路^[29],如图3-5所示:

在基波情况下时,等值电路的参数通常是分布参数的简单集中,即:

$$Z_{L1} = (r_{01} + jx_{01})l \quad (3-12)$$

$$Y_{L1} = jb_{01}l \quad (3-13)$$

式中 r_{01} 、 x_{01} 、 b_{01} 分别为单位长度线路的基波电阻、基波电抗和基波导纳。

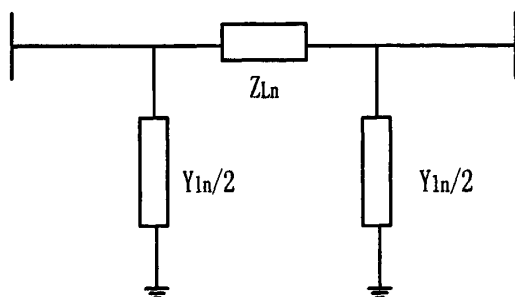


图 3-5 线路的PI型等值电路

Fig3-5 lines PI model equivalent circuit

在高次谐波的作用下,线路的分布参数特性比基波时较为明显,采用一般方法的等难以准确表示,为精确等效线路在高次谐波下的阻抗,采用双曲函数计算线路的等值参数为:

$$Z_{Lh} = Z_{Ch} \cdot sh(\gamma_h l) \quad (3-14)$$

$$Y_{Lh} = 2 \frac{ch(\gamma_h l) - 1}{Z_{Ch} \cdot sh(\gamma_h l)} \quad (3-15)$$

式中 Z_{Ch} 、 γ_h 分别为 h 次谐波时的线路特征阻抗和传播常数, Z_{Ch} 、 γ_h 可由式(3-16)、(3-17)求得

$$Z_{Ch} = \sqrt{z_{0h} / y_{0h}} \quad (3-16)$$

$$\gamma_h = \sqrt{z_{0h} y_{0h}} \quad (3-17)$$

式中 z_{0h} 、 y_{0h} 分别为 h 次谐波时单位长度的阻抗与导纳,电导一般可以忽略。

配电网中的输电线距离较短,而且当谐波计算考虑的次数较低时,可以忽略输电线的对地电容、相间电容和电导,这样输电线的谐波模型可以采用R-X串联电路^[31]。在

基波情况下，输电线的电感变化很小。在谐波情况下，谐波电抗与谐波次数成正比，而输电线谐波电阻则由于集肤效应的存在，当谐波次数越高时，输电线谐波电阻也越大，尤其是当频率超过 350Hz 时，集肤效应变得很明显。为此输电线路的单位长度的电阻值 r_{0h} (Ω/km) 可表示为：

$$r_{0h} = 0.288r_{01} + 0.138\sqrt{hr_{01}} \quad (3-18)$$

因而，输电线路单位长度的谐波参数为：

$$y_{0h} = jhb_{01} \text{ S/km} \quad (3-19)$$

$$z_{0h} = r_{0h} + jhx_{01} \text{ } \Omega/km \quad (3-20)$$

根据导线的型号，可以查出每千米线路的阻抗，由公式 (3-19)、(3-20) 即可计算线路的阻抗。

2、变压器

变压器因为铁芯的存在，励磁支路是非线性的，随着电压的增大非线性程度也增大。严格的讲，变压模型在频率的变化时，其阻抗变化也较大。在低次谐波情况下，变压器的匝间电容和对地电容可以忽略，如果再忽略变压器的励磁支路，则变压器的谐波等值电路也可以用 R-X 串联支路等效，一般变压器的谐波阻抗可按下式计算：

$$Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = \sqrt{h}R_{T1} + jhX_{T1} \quad (3-21)$$

式中： Z_{Th} —— 变压器 h 次谐波阻抗；

R_{Th} —— 变压器 h 次谐波电阻；

X_{Th} —— 变压器 h 次谐波电抗；

R_{T1} —— 变压器基波电阻；

X_{T1} —— 变压器基波电抗。

变压器短路损耗和短路电压由变压器的铭牌数据得到，可计算变压器的基波电阻和基波电抗。本文将变压器折算至高压侧基础上，在处理变压器等效时采用了变压器的 Π 等值电路，如图 3-6 和 3-7 所示，变压器的等值参数按式 (3-22)、(3-23)、(3-24) 计算：

$$Z_T' = kZ_T \quad (3-22)$$

$$Y_{T1} = (k-1)/(kZ_T) \quad (3-23)$$

$$Y_{T2} = (1-k)/(k^2 Z_T) \quad (3-24)$$

式中, Z_T 为变压器折算至高压侧的等值阻抗, k 为变压器的非标准变比。

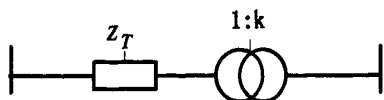


图 3-6 带理想变压器的等值电路

Fig3-6 Transformer model equivalent circuit

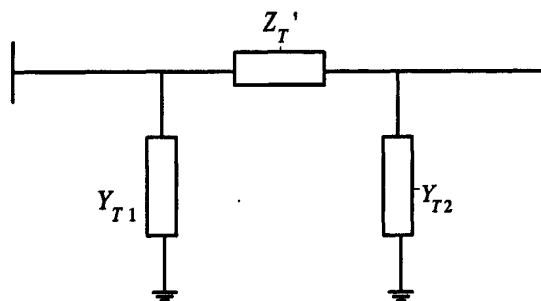


图 3-7 变压器的 pi 型等值电路

fig3-7 Transformer pi model equivalent circuit

3、负载模型

这里的负荷是指除去谐波源后的其他负荷, 谐波源负荷用注入谐波电流表示, 其余的负荷用等值阻抗 Z_h 表示, 如图 3-8 所示。由于负荷各类负荷随时间变化较大, 尤其是电网中提高功率因数的电容器容量也常有变化, 为确定负荷的谐波阻抗增加困难。由于网络中的负荷及其运行状态千差万别, 为此将负荷分为两类, 包括电动机类和其他类负载, 油田配电网中的大部分负载为电动机类负载, 此类负载近似用等值电动机模拟, 其他负载以电阻性负载等效, 前者谐波阻抗可由公式 (3-25) 表示:

$$Z_h = \sqrt{h}R_1 + jhX_1 \quad (3-25)$$

式中 R_1 、 X_1 分别为 h 次谐波时的电动机等值电阻、电抗。

采用电阻电抗混联表示负荷模型如图 3-8 所示, 电阻电抗值分别用式(3-26)、(3-27)、(3-28) 计算:

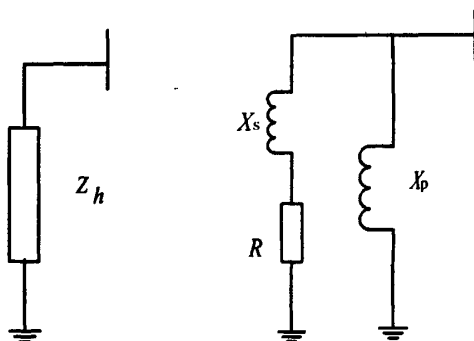


图 3-8 负荷的谐波等值电路

Fig3-8 The harmonic equivalent circuit load

$$R = \frac{U_1^2}{P_1} \quad (3-26)$$

$$X_{sh} = 0.073hR \quad (3-27)$$

$$X_{ph} = \frac{hR}{6.7 \times \frac{Q_1}{P_1} - 0.74} \quad (3-28)$$

式中： U_1 ——基波时的母线电压；

P_1 ——基波时的负载有功功率；

Q_1 ——基波时的负载无功功率。

4、谐波源模型

谐波源是指向电网注入谐波电流或在电网中产生谐波电压的电气设备，而电力电子设备与功率转换装置是最主要的谐波污染源。配电网谐波源大致可分为两类：一类是含有非线性铁磁元件的谐波源，如变压器，在大量的电力电子设备应用前，他们是主要的谐波源，但对电网的影响较小；另一类是有电力电子设备组成的变换器，如变频器、整流设备、UPS、开关电源等，这些装置存在于电网，对网络的畸变影响较大，是目前主要的谐波源。在油田配电网中主要的谐波源是第二类，因此后面的分析主要是关于电力电子设备类的谐波源。

以上两类谐波源，在已知节点电压（包括基本电压和各次谐波电压）和负荷中电力电子器件开关控制参数^{[32][33]}（如换流装置的控制角，重叠角）的情况下，其模型可由式（3-29）建立：

$$I_k = g_k(U_1, U_3, U_5, \dots, U_n, C_1, C_2, \dots, C_m) \quad (3-29)$$

其中， $k = 1, 3, 5, \dots, n$ ， n 为谐波次数； I_k 为非线性负荷产生的 k 次谐波电流； U_1, U_3, \dots, U_n 为非线性负荷节点电压中的基波和各次谐波分量； C_1, C_2, \dots, C_m 为负荷控制参数。在稳定工作的状态下，负荷控制参数可认为不变^[34]，因此式（3-29）可写为：

$$I_k = g_k(U_1, U_3, U_5, \dots, U_n) \quad (3-30)$$

本文采用恒流源模型，恒流源模型是通用的谐波源简化模型^[32]，目前应用最为广泛。

由于在电力系统中，基波电压比谐波电压大得多，可以认为基波电压决定了谐波源所产生的谐波电流，该模型不考虑节点电压谐波分量对注入电流的影响，于是式(3-31)可写为：

$$I_k = g_k(U_1), \quad k=1, 3, 5, \dots, h \quad (3-31)$$

网络中的基波电压基本不变，谐波源各次注入谐波电流由公式(3-31)确定， I_k 为恒定值，此时谐波源可看作内阻抗无穷大的各次谐波电流源，可表示为：

$$I_k = I_{0k}, \quad k=1, 3, 5, \dots, h \quad (3-32)$$

3.3.3 谐波潮流计算

由于基波电压对谐波源电流的作用远大于其他各次谐波电压的作用，采用的谐波潮流计算是时域线性算法。再根据建立的谐波源模型将基波潮流与谐波潮流分离迭代，由谐波潮流的模型和基波潮流计算的结果，对网络进行谐波潮流计算。假设一配电网节点数为 N ，需要治理的最高谐波次数为 H ， h 为谐波次数，谐波源注入的谐波电流可以表示为向量

$$I_h = [I_{h1}, \dots, I_{hi}, \dots, I_{hN}]^T \quad (3-33)$$

相应的各节点的谐波电压可以表示为：

$$U_h = [U_{h1}, \dots, U_{hi}, \dots, U_{hN}]^T \quad (3-34)$$

潮流计算的网路方程为：

$$I_h = Y^h U_h \quad (3-35)$$

从而可解得网络的各节点的各次谐波电压和总的谐波电压。谐波潮流具体求解步骤如下：

- (1) 初始化网络各节点基波电压；
- (2) 采用前推回代法求解基波潮流，得到各节点的基波电压；
- (3) 由恒流源模型根据式(3-32)求解谐波源节点各次谐波注入电流 I_k ；
- (4) 根据基波潮流结果计算网络各元件谐波潮流参数，求解各次谐波导纳矩阵；
- (5) 根据式(3-35)求解谐波网络方程，得到各节点谐波电压。

谐波潮流计算流程如图3-9所示。

3.4 本章小结

本章介绍了配电网潮流计算的特点，研究了配电网潮流计算的编号方法，建立了网络中各元件的谐波等效模型和谐波源的恒流源模型，采用基波潮流与谐波潮流分离迭代的方法进行配电网的谐波潮流计算，为谐波分析和滤波器的优化配置提供了基础数据。

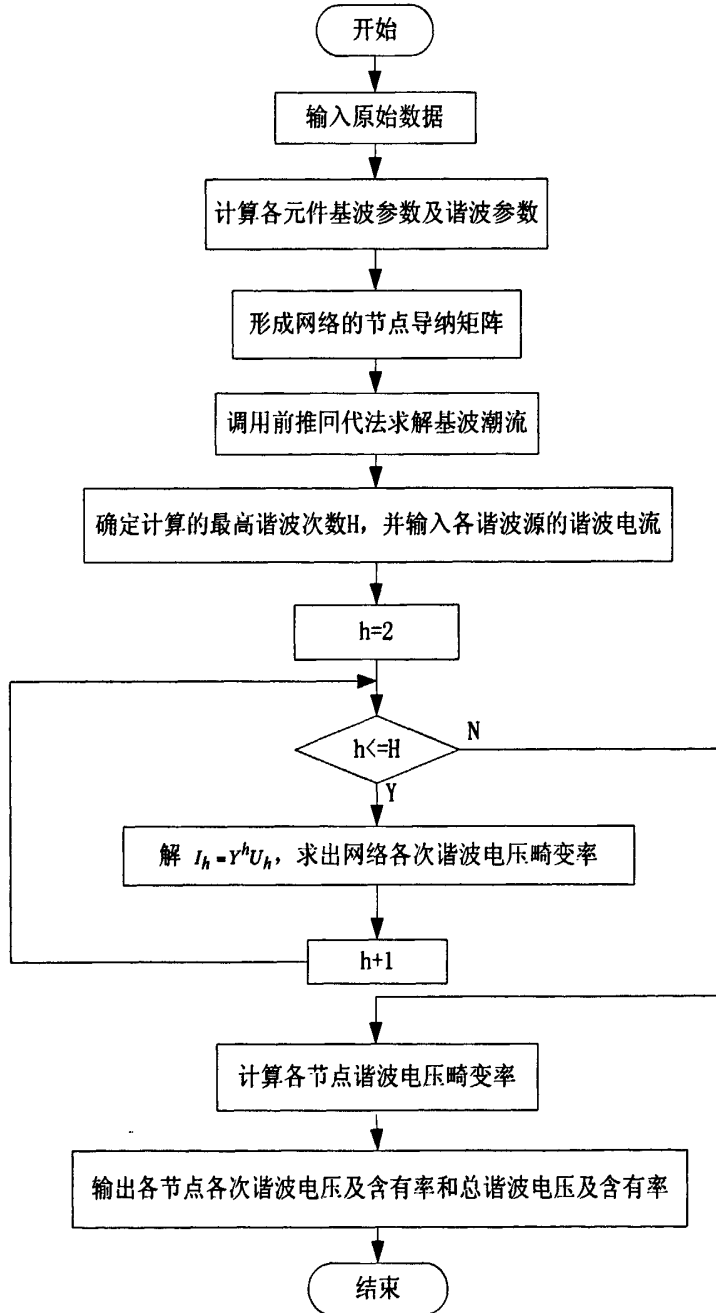


图 3-9 谐波潮流计算流程图

Fig3-9 Harmonic flow diagram

第4章 配电网无源滤波器的优化配置

无源滤波器组是由不同形式的滤波器组合而成,其参数和结构并非唯一,其优化配置的主要任务是在配电网参数,谐波源参数已知的条件下,将网络的谐波含量限制在国家标准范围内,对无源滤波器的各元件参数,滤波器安装位置,安装滤波器类型和安装组数进行寻优。在保证电网中所有节点的谐波电压含量、谐波电压畸变率和各次谐波电流符合谐波标准,滤波器可以安全可靠的运行的条件下,使全网滤波器的总费用最小。

4.1 无源滤波器对节点导纳矩阵的影响

无源滤波器的模型在第二章中已经讨论过,在应用时一般由一组或数组单调谐滤波器,若对谐波治理还没达到国家标准,可再加一组高通滤波器组成滤波器组,并联于电网。在电网中装设滤波器,会改变电网的结构,影响网络的节点导纳矩阵,以下说明加装滤波器后节点导纳矩阵的形成^{[13][35]}。

假设网络中每个节点都有安装多个不同类型、不同调谐频率滤波支路组成无源滤波器组的可能。由第二章分析,通常采用单调谐和二阶高通滤波器并联的方式组合。在有 N 个节点的配电网中,在节点 i 处最多可以安装的滤波器支路数为 J ,其中第 J 条支路为二阶高通滤波器,其余的为单调谐滤波器,根据网络中谐波含量是否符合标准,确定单调谐滤波器次数。用 C_{ij} 、 h_{cij} 、 q_{ij} 、 L_{ij} 、 R_{ij} 分别表示 i 节点第 j 条滤波器支路的电容器值、谐振次数、品质因数、电感值、电阻值。其中,当 $j=J$ 时, h 、 q 分别表示高通滤波器的截止谐波次数和参数 m ,其关系如式(4-1)、(4-2)、(4-3)、(4-4)所示:

$$h_{cij} = \begin{cases} \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_{ij} C_{ij}}} & j=1, 2, \dots, J-1 \\ \frac{1}{\omega_0 R_{ij} C_{ij}} & j=J \end{cases} \quad (4-1)$$

$$q_{ij} = \begin{cases} \frac{\sqrt{L_{ij} / C_{ij}}}{R_{ij}} & j=1, 2, \dots, J-1 \\ \frac{L_{ij}}{R_{ij}^2 C_{ij}} & j=J \end{cases} \quad (4-2)$$

$$L_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{h_{cij}^2 \omega_0^2 C_{ij}} & j = 1, 2, \dots, J-1 \\ \frac{q_{ij}}{h_{cij}^2 \omega_0^2 C_{ij}} & j = J \end{cases} \quad (4-3)$$

$$R_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{h_{cij} \omega_0 C_{ij} q_{ij}} & j = 1, 2, \dots, J-1 \\ \frac{1}{h_{cij} \omega_0 C_{ij}} & j = J \end{cases} \quad (4-4)$$

配电网无源滤波器最高次谐波考虑到 H 次，根据式 (4-5) 可计算各滤波支路在不同谐波次数下等值导纳：

$$y_{hij} = \begin{cases} \frac{1}{\frac{1}{h_{cij} \omega_0 C_{ij} q_{ij}} + j \left(\frac{h}{h_{cij}^2 \omega_0 C_{ij}} - \frac{1}{h \omega_0 C_{ij}} \right)} & j = 1, 2, \dots, J-1 \\ \frac{1}{\frac{q_{ij}^2 h^2 / h_{cij} \omega_0 C_{ij}}{q_{ij}^2 h^2 + h_{cij}^2} \left[1 + j \left[\frac{h_{cij}}{q_{ij} h} - \frac{(q_{ij}^2 h^2 + h_{cij}^2) h_{cij}}{q_{ij}^2 h^2} \right] \right]} & j = J \end{cases} \quad (4-5)$$

其中， $i = 1, 2, \dots, N$ ， $j = 1, 2, \dots, J$ ， $h = 1, 2, \dots, H$ 。

在配电网中装设无源滤波器，相当于在网络中接入负载，影响网络的谐波节点导纳矩阵。滤波器接入电网后谐波导纳矩阵就是在导纳矩阵 Y^h 上叠加上以下的矩阵：

$$\Delta Y = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^J y_{h1j} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^J y_{h2j} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{j=1}^J y_{hNj} \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

4.2 配电网无源滤波器优化配置的数学模型

根据本章提到的滤波器优化配置的基本任务，本文综合考虑网路的各次谐波电压含量、总谐波电压畸变率限制在规定范围内和滤波器安全运行的前提下，使网络中滤波器的投资费用最少。

4.2.1 目标函数

滤波器优化配置的目标函数为：

$$F_{obj} = \min \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_{ij}(Q_{CNij}) + k_1 L_{ij} + k_2 R_{ij}) \right] \quad (4-7)$$

上式中 N 为网络中的总节点数， M 为滤波器的总支路数， Q_{CNij} 为节点 i 上安装第 j 条滤波器的额定容量， L_{ij} ， R_{ij} 分别表示节点 i 第 j 条支路滤波器的电抗和电阻值， $f_{ij}(Q_{CNij})$ 为无源滤波器电容器容量费用函数， k_1 、 k_2 为无源滤波器电抗和电阻的价格系数，根据市场价格确定。而主要费用是电容器，电容器的费用函数采用以下模型：

$$f_{ij}(Q_{CNij}) = v_{ij} Q_{CNij} \quad (4-8)$$

其中 v_{ij} 为电容器的价格系数。

4.2.2 约束条件

1、网络谐波畸变约束^[36]

$$HRU_{hi} = (U_h / U_{li}) \times 100\% \leq C_{HRU} \quad (4-9)$$

$$THDU_i = \left(\sqrt{\sum_{h=2}^H U_{hi}^2} / U_{li} \right) \times 100\% \leq C_{THDU} \quad (4-10)$$

式(4-9)是网络各次谐波电压含有率的约束条件，式(4-10)是网络谐波电压总畸变率的约束条件。式中， HRU_{hi} 和 $THDU_i$ 分别为第 i 节点第 h 次谐波电压含有率和电压总谐波畸变率； U_{hi} 为第 i 节点的第 h 次谐波电压分量， U_{li} 为电压基波分量； C_{HRU} 为规定的第 h 次谐波电压含有率上限值， C_{THDU} 为规定的电压总谐波畸变率的上限值。谐波电压畸变率和各次谐波电压含量应符合国家标准^[37]，1993年技术监督局发布国家标准GB/T14549-1993《电能质量 公用电网谐波》，电压等级越高，谐波畸变限制也越严格。其中该标准规定，6-10kV的配电网的总谐波畸变率的限值为4%，奇次谐波电压含有率的限值为3.2%，偶次谐波电压含有率的限值为1.6%，超过规定限值的用电企业都应该进行谐波治理。

2、滤波器中电容器运行须满足的容量约束：

(1) 安全可靠运行约束

滤波器安装在电网运行，假设 I_{Chij} 为流过电容器的各次谐波电流， U_{Chij} 为滤波器中电容两端的各次谐波电压， Q_{Chij} 为电容器吸收的各次谐波无功功率，这三者与 U_{hi} 之间的关系为：

$$I_{Chij} = U_{hi} Y_{hij} \quad (4-11)$$

$$U_{Chij} = -jI_{Chij} / (h\omega C_{ij}) \quad (4-12)$$

$$Q_{Chij} = U_{Chij}^2 h\omega C_{ij} \quad (4-13)$$

式中， $i=1,2,\dots,N$ ； $j=1,2,\dots,J$ ； $h=1,2,\dots,H$ 。

在设计滤波器支路时，因为谐波对电容器本身具有危害，需要考虑谐波的影响，其电容器的额定电流为 I_{CNij} 、额定电压为 U_{CNij} 和额定容量为 Q_{CNij} ，电压约束、电流约束、容量约束分别有以下式表示：

$$U_{Cij} + \sum_{h=2}^H U_{Chij} \leq K_U U_{CNij} \quad (4-14)$$

$$\sqrt{I_{Cij}^2 + \sum_{h=2}^H I_{Chij}^2} \leq K_I I_{CNij} \quad (4-15)$$

$$Q_{Cij} + \sum_{h=2}^H Q_{Chij} \leq K_Q Q_{CNij} \quad (4-16)$$

式中， Q_{C1} 和 Q_{Ch} 分别为电容器的基波容量和谐波容量， K_U ， K_I ， K_Q 分别为电容器的过电压、过电流、过容量系数。令式（4-14）、（4-15）、（4-16）中的基波电压等于额定电压，得到电容器的基波电流 I_{Cij} 、基波电压 U_{Cij} 和基波容量 Q_{Cij} 。

电容器的额定电流 I_{CNij} 、额定电压 U_{CNij} 和额定容量 Q_{CNij} 存在如下关系式：

$$I_{Chij} = U_{CNij} \omega C_{ij} \quad (4-17)$$

$$Q_{CNij} = U_{CNij} I_{CNij} \quad (4-18)$$

将式（4-11）、（4-12）、（4-13）代入式（4-14）、（4-15）得：

$$\sqrt{Q_{Cij} / \omega} + \sum_{h=2}^H \sqrt{Q_{Chij} / h\omega} \leq K_U \sqrt{Q_{CNij} / \omega} \quad (4-19)$$

$$\sqrt{\omega Q_{Cij} + \omega \sum_{n=2}^H Q_{Cnij}} \leq K_I \sqrt{\omega Q_{CNij}} \quad (4-20)$$

综上所述,式(4-16)、(4-19)、(4-20)构成了滤波器安全可靠运行约束条件。

(2) 无功约束

无源滤波器提供的无功补偿应使网络的功率因数接近于1,但同时不能出现过补偿的现象^[38],有

$$Q_{\min} \leq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J Q_{Cij} \leq Q_{\max} \quad (4-21)$$

式中: Q_{\min} 为滤波器提供的无功功率下限;

Q_{\max} 为滤波器提供的无功功率上限。

综上所述,配电网无源滤波器的优化配置的数学模型是单目标,多变量,多约束,非线性的组合优化问题。

4.3 滤波器安装位置的确定

滤波器安装位置的确定,主要有三种方法:一种是枚举法,考虑网络中谐波源或谐波源邻近节点为候选节点^[13];第二种是畸变率最大法,计算网络中的谐波电压畸变率最大的节点作为安装滤波器的位置;这两种方法简单,但有时不能配置到最佳位置。还有一种是全网搜索法,综合各支路的滤波效果,针对目标函数,搜索全网络的节点。此种方法应用于较大的配电网时,计算量很大,使用不便。此外,还有基于网络固有结构理论^[39](Inherent Structure Theory of Network, ISTN)的方法,本文采用基于模糊决策网络固有结构理论的方法来确定滤波器的最佳安装位置。

4.3.1 网络固有结构理论的原理

N 个节点的配电网,节点的谐波导纳矩阵为 Y^h ,节点谐波电压列向量为 U^h ,节点的谐波电流列向量为 I^h ,其关系为:

$$U^h = (Y^h)^{-1} I^h \quad (4-22)$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{1}{\lambda_i^h} \theta_i^h (\Gamma_i^h)^T I^h \quad (4-23)$$

$$= \sum_{i=1}^N \frac{1}{\lambda_i^h} (S_i^h)^T \Gamma_i^h \quad (4-24)$$

式中， λ_i^h 为 Y^h 的特征值， θ_i^h 为 Y^h 的特征向量， Γ_i^h 为 Y^h 的左特征向量矩阵第 i 列向量， S_i^h 为灵敏度矩阵^[40]。

定义灵敏度矩阵 S_i^h 为：

$$S_i^h = \Gamma_i^h (\theta_i^h)^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \lambda_i^h}{\partial y_{11}^h} & \cdots & \frac{\partial \lambda_i^h}{\partial y_{1N}^h} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \lambda_i^h}{\partial y_{N1}^h} & \cdots & \frac{\partial \lambda_i^h}{\partial y_{NN}^h} \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

灵敏度矩阵的每个元素表明了导纳矩阵元素变化时特征值的变化情况^{[41][42]}。式(4-24)说明节点电压是 N 项之和，经大量统计表明，在实际应用中，只有少数几项对节点导纳矩阵有重大影响^[11]。应用式(4-26)验证采用的项数是否能准确的估计所有节点的电压

$$\left| 1 - \frac{\|U_k^h\|}{\|U^h\|} \right| \leq \varepsilon \quad (4-26)$$

式中， ε 为要求误差，一般可取0.1， U_k^h 为式(4-24)中影响最为重要的 k 项和的向量， $\|U_k^h\|$ 为向量的二维范数，经过多个试验仿真统计表明，特征值只要满足 $|\lambda_k| \leq 3|\lambda_{\min}|$ ，特征值 λ_k 的项，用公式(4-24)近似计算就可以满足误差要求^{[43][44]}，且只有少数几个特征值满足要求，减少了计算量。

4.3.2 基于 ISTN 选择单次滤波器安装候选节点

h 次滤波器不管装设在网络中的哪个节点上，都会使该网络导纳矩阵特征值的改变，而特征值的变化将引起谐波电压的变化。通过分析可知，第 h 次滤波装置安在系统第 i 节点上，只会使谐波导纳矩阵的第 (i,i) 元素发生变化。因此，通过较大的 $|\partial \lambda_{hk} / \partial \lambda_{hii}|$ 值对应的节点，这些节点装设滤波装置能较大的改变 λ_k^h 和 U^h ，即为滤波效果较好的节点。

具体的计算步骤如下：

- 1、根据潮流计算结果，得到需治理谐波次数，表示为 h_1, \dots, h_m ，记 h_n 为第一次

迭代的谐波次数，则 $n=1$ ；

2、计算网络的各次谐波导纳矩阵 Y^{h_n} ，解得其特征值与特征向量。检查满足条件的 $\lambda_{h_n,k}$ 计算对应的灵敏度矩阵 $S_{h_n,k}$ ，选择较大的 $|\partial\lambda_{hk} / \partial\lambda_{hii}|$ 值对应的节点位置，得到候选节点集 Ω_{h_n} ；

3、更新谐波次数， $n=n+1$ ，若 $h_n < h_m$ ，回到步骤2，否则，终止。

4.3.3 模糊意见决策研究

模糊决策的目的是要把论域中的对象按优劣进行排序，或者按某种方法从论域中选择一个“令人满意”的方案^[45]。

模糊意见集中决策的方法与步骤：

假设论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，将 X 中的元素排列，第 m 种排列（意见）为

$V_m = \{v_1, v_2, \dots, v_r\}$ ，即 X 中的元素的某一个排序，令 $x_i \in X$ ， $B_m(x_i)$ 表示第 m 种排序 V_m 中排在 x_i 之后的元素的个数，如

若 x_i 在 V_m 中的排在第 1 位，则 $B_m(x_i) = n-1$ ；

若 x_i 在 V_m 中的排在第 2 位，则 $B_m(x_i) = n-2$ ；

若 x_i 在 V_m 中的排在第 k 位，则 $B_m(x_i) = n-k$ ；称 $B(x_i) = \sum_{m=1}^r \eta_m B_m(x_i)$ 为 x_i 的 Borda 数，

其中 η_m 为考虑到每种情况的重要程度的权重，论域中的所有元素可按 Borda 的大小排序，此排序就是意见集中后的一个合理意见^[46]。

4.3.4 基于模糊意见决策确定滤波器的最佳配置位置

由 ISTN 得到各次滤波器安装位置的候选节点集 Ω_{h_n} ，计算其 Borda 数，根据各节点的谐波电压畸变率赋给各节点一定的权值。假设畸变率最大的节点 k 的权重为 1，则节点 i 与节点 k 的电压畸变率之比为节点 i 的权重。将 Borda 数排序，返回候选集合，找到集合中 Borda 数最大的节点即为滤波器的最佳配置位置。

4.4 粒子群算法研究

粒子群算法（particle swarm optimization, PSO）属于群体智能算法的一种，源于对鸟群飞行觅食行为的模拟，通过鸟（粒子）之间的集体协作使群体寻到最优。

4.4.1 粒子群算法生物模型^[47]

粒子群算法的基本思想源于仿生学，设想有这样一个场景：一群鸟在某个区域内随机的搜索食物，这个区域里只有一块食物。而所有的鸟都不知道食物在哪里，但是他们知道当前的位置距离食物还有多远。那么找到食物的最优策略就是搜寻目前离食物最近的鸟的周围区域。通过每只鸟相互交流，借鉴来改变自身的位置，使鸟群更加接近食物，最终找到食物。

4.4.2 粒子群算法的数学模型

从粒子群算法的生物模型，抽象出算法的数学模型。在粒子群优化算法中，每个个体称为一个“粒子”，每个粒子代表着一个可行解。假设在一个 D 维的搜索区域内，每个粒子看作空间中的一个点。假设群体由 m 个粒子组成， m 也称为粒子群的规模，设 $\mathbf{z}_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iD})$ 表示第 i 个粒子 ($i=1, 2, \dots, m$) 的 D 维位置矢量，事先设定与待决的问题有关的适应度函数， \mathbf{z}_i 当前得适应度值，其作用是评价粒子位置的好坏； $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD})$ 为粒子群的飞行速度，即粒子移动的距离， $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id}, \dots, p_{iD})$ 表示粒子迄今为止找到的最优位置； $\mathbf{p}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd}, \dots, p_{gD})$ 为整个粒子群迄今为止找到的最优位置^[48-50]。

在每次搜索过程中，粒子根据式（4-27）、（4-28）更新速度和位置：

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(p_{id} - z_{id}^k) + c_2r_2(p_{gd} - z_{id}^k) \quad (4-27)$$

$$z_{id}^{k+1} = z_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (4-28)$$

式中： $d=1, 2, \dots, D$ ； k 为迭代次数；

w ——为惯性因子；

r_1, r_2 —— $[0,1]$ 之间的随机数；

c_1, c_2 ——学习因子；

p_{id} ——d 维上的粒子迄今为止搜到的局部最优解；

p_{gd} ——d 维上的整个粒子群迄今为止搜到的全局最优解；

z_{id} ——第 i 个粒子位置在第 d 维上的值；

v_{id} ——第 i 个粒子速度在第 d 维上的值。

公式(4-27)中的第二项是粒子群的“认知”部分，表示粒子本身的学习能力，第三项是粒子群的“社会”部分，表示各粒子之间的一种协作能力^{[51][52]}，粒子群通过自身的学习，不断的提高粒子群的质量，使整个群体朝着目标的方向前进，微粒根据上一次迭代的速度、当前的位置和自身最好经验与群体最好的经验之间的距离来更新速度，再根据式(4-28)更新的粒子群的位置。PSO 在每一次迭代中，粒子通过评价各自位置的适应值，群体中的粒子记忆自己当前所找到的最好位置，称之为“局部最优 p_{best} ”，还可以记忆粒子群中所有粒子找到的最好位置，称为“全局最优 g_{best} ”。局部最优解和全局最优解这两个最优变量使得粒子朝着最优的方向靠近，最终搜索到最优解^{[53][54]}。

4.4.3 粒子群算法的参数分析

粒子群算法的参数包括：惯性因子、学习因子，种群规模，最大迭代次数，最大速度等。

1、惯性因子

惯性因子控制着前一速度对当前速度的影响，平衡着粒子的探索能力和开掘能力， w 较小时，粒子记忆前一速度的权重小，主要在当前值附近搜寻，局部搜索能力加强，有利于算法的收敛。 w 较大时，粒子记忆前一速度的权重大，能搜索以前未达到的区域，有利于跳出局部最优点。

2、学习因子

此参数使微粒具有自我总结的能力，并可以向微粒群中好的粒子学习，达到提高自己的目的。学习因子的实质是粒子群的学习能力，过低的值会导致粒子在目标区域外徘徊，过高的值导致粒子越过最优目标，陷入局部最优解。当 $c_1=0$ 时，表明粒子只有“社会”部分，有能力达到新的搜索空间，收敛速度比一般更快，更容易陷入局部最优解；当 $c_2=0$ 时，粒子只有“认知”部分，个体之间没有交互，其算法变成了一个多起点的随机搜索，获得解的几率非常小^[55]。

3、种群规模

粒子群的个体数一般可取 20-40，对于较为复杂的粒子数可取到 100，种群太大会影响计算时间，降低收敛速度；种群太小将影响算法的并行搜索性能，难以得到最优解。

4、最大速度，最小速度

在粒子群算法中，速度的最值非常重要的，决定了当前位置与最好位置之间的区域分辨率，其值太大粒子运动轨迹可能失去规律性^[56]，会导致微粒跳过最好解，太小的话会导致对搜索空间的不充分搜索。因此，既应该限制粒子的最小速度，又要限制速度的最大值，保证粒子合理的运动轨迹。

5、最大迭代次数

粒子群算法收敛次数一般为 20-50，即可达到最优解附近，当遇到复杂问题或进行算法比较时通常也设置的较大，500-1000，大多数情况下设为 50 即可获得最优解。

4.4.4 粒子群算法的实现步骤

1、初始化粒子群参数。设置当前迭代次数为 n ，设最大迭代次数 N 、种群规模，设置每个粒子的初始位置和速度；

2、测量每个粒子的适应值；

3、将每个粒子当前的适应值与自身个体的局部最优值 $pbest$ 比较，若粒子的适应值优于个体的局部最优值 $pbest$ ，则令 $pbest$ 等于此粒子的当前适应值；

4、将每个粒子当前的适应值与群体的全局最优值 $gbest$ 比较，若粒子的适应值优于个体的全局最优值 $gbest$ ，则设置 $gbest$ 等于此粒子的当前适应值；

5、根据式 (4-27)、(4-28)，更新粒子的速度和位置；

6、 $n=n+1$ ，返回第二步，直到获得一个预期的适应值或者 n 达到设定的最大迭代次数终止。

4.4.5 基于粒子群算法的配电网滤波器参数优化

配电网的谐波潮流确定后，配电网滤波器参数的优化是采用优化设计方法对滤波器中电容、电感、电阻值和各条支路之间的相互配合进行优化，通过前面章节的分析，在设计过程中应考虑多个因素（如经济因素、技术因素），尤其对系统的谐波畸变、滤波器总费用、无功补偿等应着重考虑。以电容值和品质因数为控制变量产生初始群体，对滤波器的参数进行优化。本文采用以上章节分析的改进的粒子群算法对无源滤波器的参数进行优化，以下作具体阐述。

4.4.6 粒子群算法的配电网滤波器参数优化

1、群体编码

粒子编码的方法会直接影响粒子群算法的优化性能，在实际应用中，粒子的编码必须与求解的问题相对应，抛开具体问题来讨论采用哪一种编码形式是没有意义的。通常评价编码优劣有三个规范，包括完备性、健全性和非冗余性。

编码方法有二进制编码、实数编码、符号编码、格雷码编码等。常用的二进制编码是由二进制符号 0 和 1 组成的二值符号集 $\{0, 1\}$ ，但编码长度较长，增加复杂度^[50]。本文采用的粒子群编码方法为十进制编码，在计算适应度时无需解码，较为简单。

根据建立的滤波器优化配置模型，滤波器配置的最佳位置通过基于模糊意见集中决策网络固有结构理论已经确定。因此，粒子编码的维数即为电容值、电感值、电阻值和品质因数，粒子编码的形式为： $pos = [C_1, C_2, \dots, C_H, L_1, L_2, \dots, L_H, R_1, R_2, \dots, R_H, Q]$ 。

根据无源滤波器设计时的谐振原理，即：

$$L_h = \frac{1}{\omega_h^2 C_h}, R_h = \frac{\omega_h L_h}{Q} \quad (4-29)$$

电感值和电阻值可有上式确定，因此粒子的编码形式变为 $pos = [C_1, C_2, \dots, C_H, Q]$ ，极大的减少了编码长度。根据工程经验，品质因数一般取 30-60，电容的范围根据无功补偿约束来确定，初始化粒子群时电容值和品质因数均随机生成。

2、适应值计算

粒子群算法用适应度来描述群体中粒子的优良程度，对每个粒子进行适应度评价是为了更新局部最优解和全局最优解，因此在进行更新之前需要对每个粒子进行适应值计算。根据先前建立的目标函数，将适应度函数表示为如下形式：

$$Fit_ness = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_{ij}(Q_{CNij}) + k_1 L_{ij} + k_2 R_{ij}) \right] \quad (4-30)$$

在滤波器的优化模型中，计算的是目标函数的最小值，转化到适应度函数中即计算式 (4-30) 的最小值，通过粒子群中初始化的各支路滤波器的参数，计算每个粒子对应的安装滤波器的费用，为更新局部最优值和全局最优值做准备。

3、约束条件的处理

根据前面章节建立的模型，配电网滤波器的优化配置的约束条件包括等式约束（谐波潮流约束）、系统谐波畸变约束、滤波器安全运行约束和电网无功功率补偿约束，处

理过程如下:

(1) 等式约束

在滤波器的优化设计时,等式约束条件主要是指网络的谐波潮流方程。考虑系统在三相对称的条件下运行,计算时考虑一相潮流方程。由前面章节的式(3-35),在基波潮流确定后,对每个粒子(滤波器的参数)加入电网都要进行谐波潮流计算,确定每个粒子加入后网络的谐波畸变率。

(2) 谐波畸变约束

根据4.1节式(4-9)、(4-10)描述的谐波畸变约束,各次电压谐波含量应不超过 C_{HRU} ,总谐波电压畸变率应不超过 C_{THDU} 。采用遗传算法中选择、复制的思想,将谐波约束融入对每个粒子的评价上。对于每一个粒子在谐波潮流完成后,计算得各次谐波电压畸变率和总谐波电压畸变率,判断这两项参数是否在规定范围内,将在规定范围内的粒子保留,进入下一次迭代,而这两项参数超过规定范围的将其淘汰。本文采用的是全局版的粒子群算法,为了构造相同粒子群规模,将合格的粒子复制,补充到新的粒子群中。通过复制保存符合谐波畸变约束的粒子,比循环判断谐波畸变率的方法节省了运算时间。

(3) 安全运行约束

根据4-1节式(4-14)、(4-15)、(4-16),运行于系统的滤波器应满足电容器本身的容量约束,电压约束,电流约束,转化为容量约束为式(4-16)、(4-19)、(4-20),对于电容器就是要求电容器的额定容量。将每个粒子中滤波器参数分别代入式(4-16)、(4-19)、(4-20)中,取等号时的容量值,最后取其中的最大值作为滤波器电容器的额定容量,保证电容器在系统中安全运行。

(4) 无功约束

在配电网的滤波器优化配置过程中,根据式(4-21),符合无功功率补偿的要求。本文采用的限制无功补偿的方法是,通过基波潮流计算得到网络中无功功率分布,在初始化各粒子时,根据网络中的无功产生符合条件的粒子,既限制了无功约束的范围又限制了粒子的范围,使初始化的粒子范围不至于太大,缩小了粒子群的搜索空间。

4、最小速度、最大速度的限制,更新速度位置

由前面分析,粒子群算法中对速度最大值的限制是很重要的。本文采用的限制速度的方法是:当前速度小于规定的最小速度时,则使当前速度为最小速度,当前速度大于最大速度时,则令当前速度为最大速度,在其中时,就等于当前速度。可用下式表示

$$vel = \begin{cases} v_{\min} & v < v_{\min} \\ v & v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ v_{\max} & v > v_{\max} \end{cases} \quad (4-31)$$

最小速度和最大速度的限制为了更新速度和位置。

5、算法参数的选择

前面章节阐述了粒子群算法的模型及参数分析,根据滤波器优化配置的模型选择参数根据如下:最大迭代次数 N 取为 50,学习因子 C_1 、 C_2 一般采用固定值,根据问题设置,种群规模 M 取为 40-100,粒子群维数 D 根据考虑的滤波器次数设定。最大速度 V_{\max} 一般设置为粒子群变化范围的 10%-20%,将其设置为粒子群变化范围的 15%。

对参数惯性因子 w 进行改进,并不将其设为定值,而是设为一个随时间线性减少的函数,其函数形式表示为:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (4-32)$$

其中, w_{\max} 为初始惯性因子, w_{\min} 为最终惯性因子, k_{\max} 为最大迭代次数, k 为当前迭代次数。式(4-32)所表示的函数使得粒子群在刚开始的时候倾向于开掘(exploitation),然后逐渐转向于开拓(exploration),从而在局部区域调整解,提高粒子群算法的性能^[3]。

一般在实际应用时,这些参数与实际问题的类型有关,不能用统一的参数解决所有的问题,随着问题特征的不同,有效参数的差异通常比较明显。因此,以上参数应用到实际问题中,如何改善算法的性能,还需要深入研究。由于具体网络的不同,以上参数根据算法的调试来确定。

6、终止条件

除了采用最大迭代次数作为终止条件,还设置用于终止算法的阈值 ε ,当连续 50 次迭代中适应度的梯度仍然没有变化,则退出迭代。

4.4.7 粒子群算法的配电网滤波器参数优化算法步骤

配电网无源滤波器优化配置的整体步骤及说明如下:

1、初始化配电网信息。输入配电网的支路信息、节点数、变压器型号、有功功率、无功功率、节点的注入谐波电流、限制系统谐波畸变参数及粒子群算法的相关控制参数,包括粒子群规模、学习因子、粒子的速度 vel 、粒子的初始位置 pos 、个体的局部最优值

pbest、全局最优值 **gbest**。

2、计算网络各元件的各次谐波下的模型参数，进行基波潮流和谐波潮流的计算，得到系统各节点的谐波评价参数（谐波电流畸变率，各次谐波电压畸变率和总谐波电压畸变率），判断网络的谐波参数是否超过规定的标准，若超过规定，则进行谐波治理，若在规定范围内，则结束程序。

3、形成谐波导纳矩阵，采用基于模糊意见集中决策网络固有结构理论确定滤波器的最佳位置。

4、根据基波潮流计算的无功功率分布，确定粒子群参数范围，根据谐波潮流计算的结果判断应考虑谐波次数，确定粒子群维数，随机生成符合范围的粒子。

5、计算各粒子的适应值。

6、根据各粒子修正谐波导纳矩阵 $Y = Y^h + \Delta Y$ ，进行谐波潮流计算，判断各次谐波电压畸变率和总谐波电压畸变率是否在规定范围内，利用遗传算法复制的思想，将符合标准的粒子保留到下一次迭代，并且保存粒子相应的适应值，而将超出标准的粒子淘汰。

7、比较每个粒子的适应值和当前个体最优解 **Pbest**，若对于某个粒子来说，适应值小于 **Pbest**，则将适应值作为粒子当前的最优解 **Pbest**。

8、选择所有粒子的个体最优解中的最小值作为粒子当前的全局最优解 **gbest**。

9、计算粒子的速度，更新粒子的速度和位置。

10、判断是否达到收敛条件，若未达到，返回第五步继续运算，若满足收敛条件，则输出最优结果。

基于复制思想的粒子群算法流程如图 4-1 所示。

4.5 本章小结

首先分析了无源滤波器在电网中的模型，根据潮流计算的谐波电压，谐波电流等谐波参数，以电容值和品质因数为控制变量，以电容器的容量和电压为约束条件，建立了无源滤波器优化配置模型。研究了模糊意见决策理论，采用基于模糊意见决策网络固有结构法确定滤波器的最佳配置位置。深入研究了粒子群优化算法，采用改进的粒子群算法以电容值和品质因数为控制变量产生初始群体，对滤波器的参数进行优化设计。

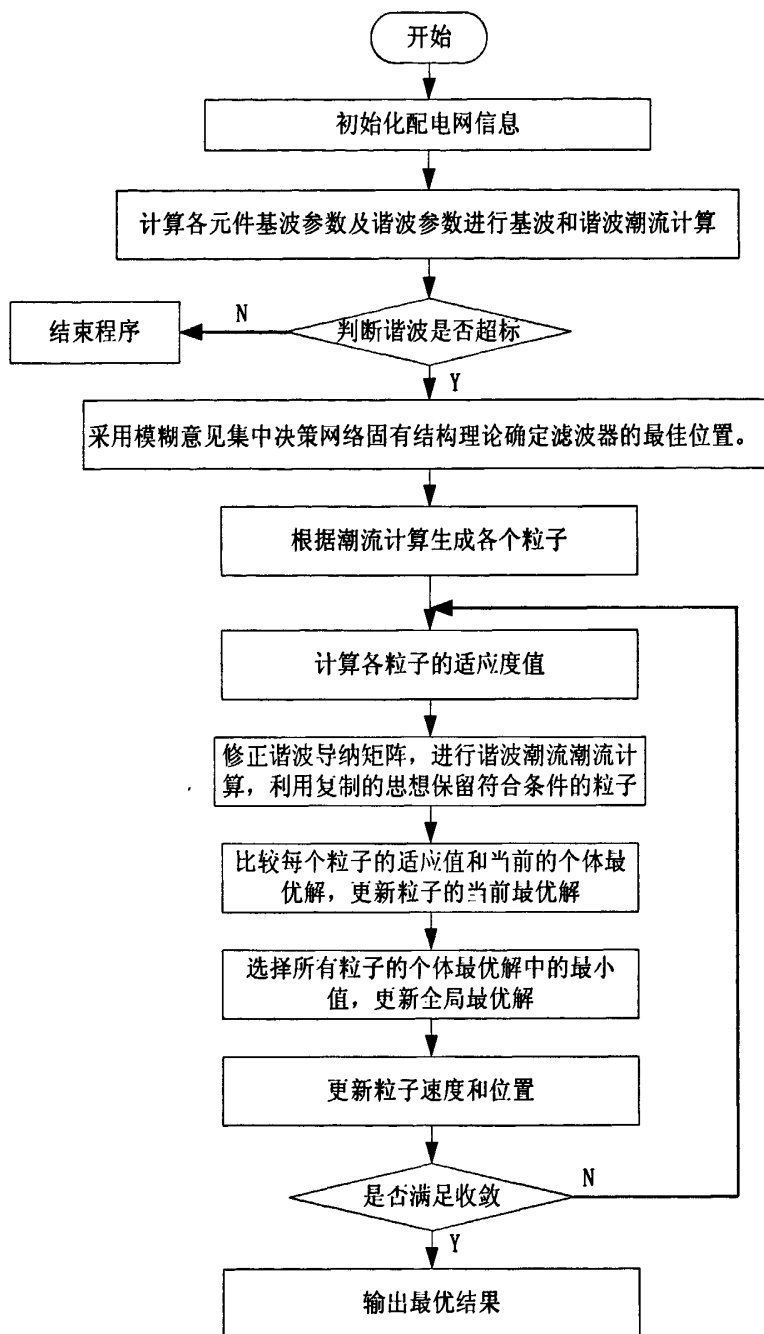


图 4-1 滤波器优化配置流程图
Fig4-1 Filter optimization program

第5章 算例分析

前面章节研究了配电网的滤波器优化问题，建立了滤波器优化配置模型，随后对粒子群算法用于配电网滤波器优化配置出现的问题进行了详细研究，并根据实际问题进行了改进，最后将粒子群优化算法应用到配电网滤波器优化配置中。本章将结合油田采油厂配电网实际数据对提出的方法进行验证，从而证明该算法的正确性与有效性。

5.1 配电网参数信息

以胜利油田纯梁采油厂纯辛一站一条 6kV 配电线路为例，对前面提出的粒子群算法应用于滤波器优化配置进行实验。该段线路在正常运行情况下，有功负荷为 208.3kW，无功负荷为 187.9kVar，配电网地理信息图见附录 1，由图可知该区块有 15 口油井、3 台注水泵，具体的负荷参数如表 5-1 所示。该段主线路采用 LGJ-70mm² 导线，长度 3.46 公里，分支线采用 LGJ-50mm² 导线，长度为 3.32 公里，整条配电线路共有杆基 113 个。采油厂配电网拓扑结构如图 5-1 所示，可知该条线路共有 40 个节点，39 条支路，选取此网络进线节点 1 作为平衡节点，采用 3-1 节提到的节点编号方法对网络进行编号。

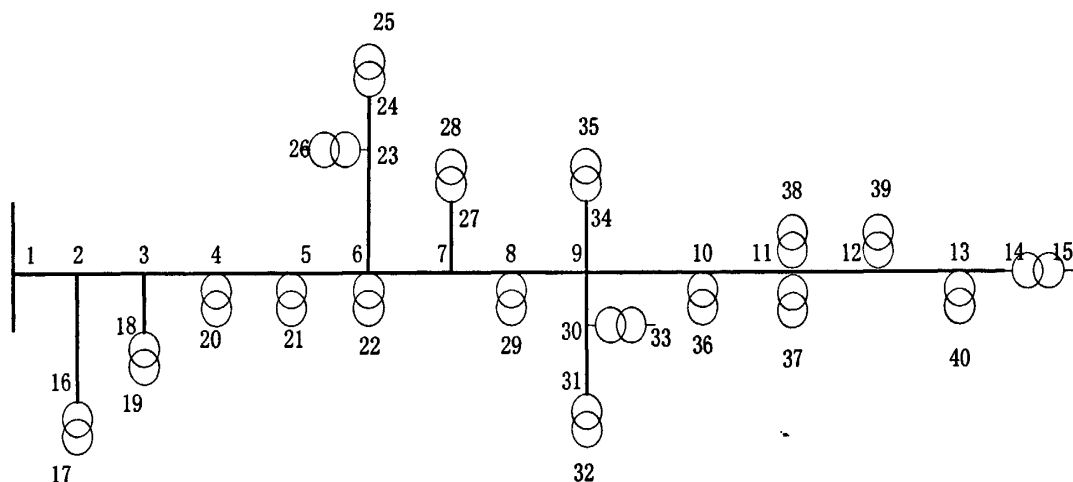


图 5-1 配电网拓扑结构

Fig5-1 Topology of distribution network of oil recovery station

采油厂配电网纯辛一线路各负荷具体参数如表 5-1 所示。由于油田配电网中的负荷大多是游梁式抽油机，负载波动较大，存在“大马拉小车”现象，功率因数较小。

表 5-1 采油厂配电网负荷参数表

Table5-1 The parameter list of the distribution network load of oil recovery station

井号	设备名称	有功功率 (kW)	无功功率 (kVar)
71 计量	抽油机	14.5	6.675
41-37	抽油机	10.825	13.257
41-更 36	电泵	8.55	9.75
41-28	抽油机	10.65	6.15
47#	抽油机	10.7	6.15
41-17	抽油机	6.525	6.975
C53	抽油机	3.225	14.4
41-8	抽油机	12.95	16.875
41-35	抽油机	7.365	8.4
47N10	抽油机	6.075	7.875
26-36	抽油机	15.305	8.95
26-02	抽油机	5.625	5.31
26-48	抽油机	12.925	9.975
47-11	抽油机	49.8	39.675
26-3	抽油机	9.775	6.45
46#	抽油机	5.625	5.831
LC201	电泵	13.375	7.875
LNX201	电泵	4.575	7.35

该段线路所有的配电变压器参数如表 5-2 所示。

表 5-2 采油厂配电网变压器参数表

Table5-2 The parameter list of transformers in the distribution network

井号	变压器型号	变压器容量(KVA)	空载损耗(W)	负载损耗(W)	阻抗电压(%)	空载电流(%)
71 计量	S7-30/6	30	150	800	4	2.8
41-37	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
41-更 36	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
41-28	S9-30/6	30	130	600	4	2
47#	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
41-17	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
C53	S9-30/6	30	130	600	4	2

井号	变压器型号	变压器容量(KVA)	空载损耗(W)	负载损耗(W)	阻抗电压(%)	空载电流(%)
41-8	S7-30/6	30	150	800	4	2.8
41-35	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
47N10	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
26-36	S9-50/6	30	120	870	4	2
26-02	S7-50/6	50	187	1150	4	2
26-48	S11-100/6	100	200	1500	4	1.6
47-11	S9-100/6	100	280	1500	4	1.4
26-3	S11-30/6	30	90	600	4	2.1
46#	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
LC201	S11-50/6	50	135	870	4	1.2
LNX201	S11-50/6	50	135	870	4	1.2

对各个负荷进行测量发现此段线路共有 5 处谐波源负荷，分别是混输泵和注水站。对此 5 处谐波源负荷进行了谐波参数测量，分别是节点 17、22、32、35、39，其各次谐波电流值如表 5-3 所示。

表 5-3 注入配电网谐波电流

Table5-3 Harmonic currents injected into distribution network

节点	各次谐波大小和相位差（单位 A 和度）					
	5 次大小	5 次相位	7 次大小	7 次相位	11 次大小	11 次相位
17	5.3	70	3.05	25	0.38	-40
22	2.4	46	1.0	-65	0.3	-20
32	3	-45	1.1	75	0.1	-22
35	6.94	60	3.8	-50	0.9801	-15
39	4.15	41	3.2437	-52	1.2978	47

经过谐波潮流计算得知此条线路上 5 次谐波含量，7 次谐波含量和总谐波畸变率均超过国家标准，各节点的谐波电压畸变率的计算结果如表 5-7 所示，通过以上计算参数可知，需要对此条线路进行谐波治理。

5.2 滤波器的配置结果与分析

根据第四章 4-3 所述，对配电网滤波器的优化配置，在 MATLAB 环境下编写了基

于模糊决策网络固有结构理论配置滤波器的最佳位置的程序, 根据网络固有结构理论算出的网络中灵敏度矩阵中较大的元素, 即各次滤波器安装位置的候选节点如表 5-4 所示。

表 5-4 各次滤波器安装的候选节点

Table5-4 The filter installation candidate node

滤波器阶数	候选节点集合
5 阶滤波器	2, 4, 23, 9
7 阶滤波器	9, 12, 30, 31
11 阶滤波器	16, 13, 6, 31

根据模糊意见决策理论, 计算候选节点的 Borda 数如表 5-5 所示。根据 Borda 大小和候选节点集, 得到的滤波器最佳配置位置结果如表 5-6 所示。

表 5-5 候选节点的 Borda 数

Table 5-5 The Borda of candidate node

节点号	Borda 数	节点号	Borda 数
4	8.1661	6	3.9288
9	6.5241	16	3.4650
12	6.3565	31	3.0216
13	5.9453	30	1.4127
2	4.3864	23	0

表 5-6 滤波器的最佳配置位置

Table5-6 The best location filter

滤波器阶数	最佳安装位置
5 阶滤波器	4
7 阶滤波器	9
11 阶滤波器	13

根据第四章 4-4 所述, 编写了采用改进粒子群算法优化滤波器参数的程序, 本例的算法参数设置如下: 最大迭代次数 $N=200$, 种群规模 $M=20$, 学习因子 $c_1=c_2=1.49445$, 取惯性因子的最大值 w_{max} 为 1.1, 最小值 w_{min} 为 0.7。滤波器安全运行的系数为: $K_u = 1.1$, $K_I = 1.3$, $K_Q = 1.35$, 滤波器的费用参数, k_1 为 320 元/mh, k_2 为 88 元/ Ω , 国家规定的 6kV 第 h 次谐波电压含有率限定值 $C_{HRU}=3.2$, 总谐波电压畸变率限定值 $C_{THDH}=4$ 。按以上参数配置滤波器前后, 配电网的谐波畸变情况如表 5-7 所示。

表 5-7 配电网滤波前后所有节点的谐波畸变情况

Table5-7 Distribution of all the nodes before and after filtering case harmonic distortion

节点号	5 次谐波含有率%		7 次谐波含有率%		11 次谐波含有率%		总电压畸变率%	
	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后
1	4.6119	0.4372	3.2123	0.5170	1.0010	0.2952	5.7086	0.7386
2	5.2129	0.4370	3.5130	0.5174	1.5013	0.2955	6.4629	0.7386
3	5.1966	0.1844	3.5068	0.2051	1.4961	0.1704	6.4452	0.3241
4	5.3961	0.1835	3.5067	0.1942	1.4960	0.1642	6.5447	0.3136
5	5.1955	0.2034	3.5067	0.1807	1.4958	0.1552	6.4441	0.3135
6	5.1949	0.2631	3.5073	0.1644	1.4957	0.1394	6.4440	0.3394
7	5.1946	0.3093	3.5081	0.1603	1.4958	0.1245	6.4443	0.3704
8	5.1953	0.3603	3.5096	0.1683	1.4962	0.1099	6.4456	0.4121
9	5.1970	0.4492	3.5125	0.2025	1.4971	0.0847	6.4489	0.4992
10	5.1971	0.4641	3.5129	0.2144	1.4970	0.0775	6.4491	0.5173
11	5.1976	0.5080	3.5142	0.2554	1.4970	0.0553	6.4502	0.5716
12	5.4987	0.5239	3.8154	0.2692	1.5974	0.0485	6.8807	0.5904
13	5.1981	0.5263	3.5150	0.2731	1.4972	0.0384	6.4511	0.5945
14	5.1979	0.5267	3.5148	0.2732	1.4971	0.0385	6.4508	0.5941
15	5.4387	0.5512	3.6771	0.2852	1.5657	0.0393	6.7492	0.6213
16	5.2195	0.5024	3.5167	0.5791	1.5033	0.3173	6.4707	0.8292
17	6.1081	0.9262	4.2062	0.9847	1.6870	0.4707	7.6057	1.4304
18	5.1957	0.1841	3.5061	0.2054	1.4959	0.1703	6.4441	0.3233
19	5.4324	0.1921	3.6657	0.2144	1.5639	0.1774	6.7375	0.3384
20	5.4354	0.1925	3.6678	0.2035	1.5645	0.1715	6.7412	0.3276
21	5.4332	0.2137	3.6660	0.1885	1.5629	0.1622	6.7381	0.3272
22	5.7580	0.3952	3.9820	0.2485	1.5711	0.1812	7.1749	0.5004
23	5.1030	0.2621	3.5059	0.1643	1.4950	0.1394	6.4416	0.3393
24	5.1907	0.2623	3.5043	0.1633	1.4943	0.1393	6.4387	0.3393
25	5.4258	0.2743	3.6626	0.1713	1.5614	0.1452	6.7299	0.3541
26	5.4336	0.2756	3.6675	0.1717	1.5633	0.1452	6.7393	0.3543
27	5.1938	0.3095	3.5075	0.1606	1.4955	0.1245	6.4432	0.3691
28	5.4271	0.3235	3.6649	0.1677	1.5624	0.1295	6.7325	0.3864
29	5.4351	0.3767	3.6710	0.1757	1.5645	0.1149	6.7427	0.4312
30	5.1970	0.4478	3.5123	0.1985	1.4971	0.0856	6.4487	0.4964
31	5.1971	0.4452	3.5123	0.1954	1.4972	0.0853	6.4489	0.4933

节点号	5次谐波含有率%		7次谐波含有率%		11次谐波含有率%		总电压畸变率%	
	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后
32	5.8185	0.4480	4.2784	0.1186	1.5702	0.1010	7.3908	0.4745
33	5.4393	0.4681	3.6754	0.2075	1.5660	0.0896	6.7488	0.5194
34	5.1983	0.4592	3.5139	0.2122	1.4982	0.0954	6.4509	0.5145
35	5.4613	0.6135	3.6985	0.3684	1.5829	0.2304	6.7831	0.7502
36	5.4388	0.4852	3.6752	0.2249	1.5653	0.0813	6.7482	0.5413
37	5.4410	0.5324	3.6786	0.2665	1.5668	0.0583	6.7521	0.5984
38	5.4246	0.5304	3.6646	0.2658	1.5585	0.0585	6.7294	0.5962
39	6.2130	1.2046	4.1509	0.9665	1.5948	0.4614	7.6403	1.6116
40	5.4388	0.5519	3.6773	0.2855	1.5660	0.0392	6.7495	0.6214

通过程序计算可知,滤波前纯辛一线路的谐波电压畸变情况严重,经过滤波器优化配置程序计算后得到此线路的谐波电压限定在国家规定标准范围内,滤波后的谐波电压畸变率如表 5-7 所示,滤波器的优化参数如表 5-8 所示。

表 5-8 滤波器最优参数值

Table 5-8 The passive filter Optimal parameter

滤波器阶数	电容值 (μF)	电感值 (H)	电阻值 (Ω)	电容容量 (kVA)	品质因数
5阶滤波器	43.4588	9.3352	0.0977	190.29	30
7阶滤波器	13.2324	15.6425	0.1637	59.70	30
11阶滤波器	14.7189	5.6948	0.0596	66.37	30

为了较直观分析谐波治理的效果,将配电网滤波前后网络各节点的谐波电压总畸变率作对比,结果如图 5-2 所示,由图可见,滤波前网络中各节点的谐波电压畸变率均超过国家标准规定,安装滤波器后各节点的电压谐波畸变率得到了很好的抑制。

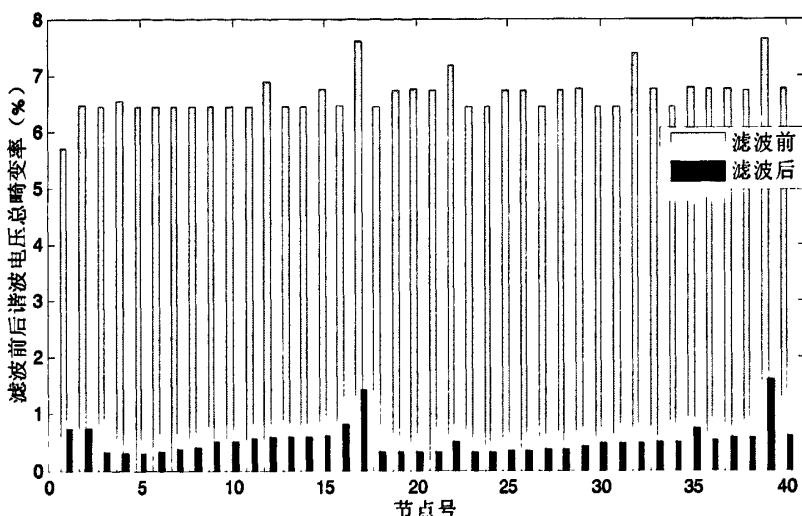


图 5-2 滤波前后节点的谐波电压总畸变率

Fig5-2 The total harmonic distortion of all nodes before and after filtering

5.3 设计方法比较

为了进一步验证改进粒子群算法的正确性，本文将其和遗传算法用于无源滤波器优化配置进行比较分析，经过多次程序运行，发现改进的粒子群算法的稳定性和鲁棒性优于遗传算法，粒子群算法每次都能得到最优解，遗传算法可能陷入局部最优解，且收敛速度较慢，在一次实验中改进的粒子群算法和遗传算法的无源滤波器优化配置的收敛曲线如图 5-3 所示，另外，由图可见，本文算法在无源滤波器的优化配置中对最优解的挖掘比遗传算法更优，遗传算法得到的适应度值和改进粒子群算法的结果接近，从而证明了本文算法的正确性。

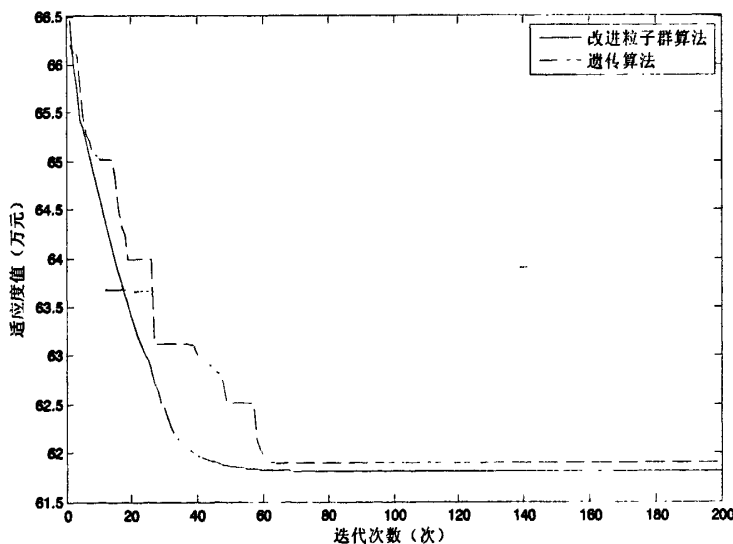


图 5-3 粒子群算法和遗传算法的收敛特性

Fig5-3 convergent traits of PSO and genetic algorithm

由于改进的粒子群算法和遗传算法都是随机算法^[57]，对改进的粒子群算法和遗传算法进行了6次计算，其收敛次数和最优目标函数如表5-9所示，遗传算法的平均收敛次数为66.7次，本文算法的平均收敛次数为52.8次。由表可见，两种算法均在迭代200次内收敛，但就平均收敛次数而言，改进的粒子群算法更占优势。本文算法的最优目标函数平均值也优于遗传算法的最优目标函数平均值。可以看出，改进的粒子群算法比遗传算法的搜索效率更高，得到的结果也较优。

表5-9 粒子群算法和遗传算法6次计算结果

Table 5-9 6 Results of PSO and genetic algorithm

样本	收敛次数(次)		最优目标函数值(万元)	
	改进的粒子群算法	遗传算法	改进的粒子群算法	遗传算法
1	56	65	61.8189	61.9027
2	35	76	61.6717	62.1935
3	45	75	61.7438	62.0464
4	64	59	61.8022	62.2587
5	56	55	61.7176	62.0058
6	61	70	61.8564	61.9741

为进一步研究谐波治理效果，将本文算法与遗传算法用于配电网无源滤波器优化配置后，网络各节点的总谐波电压畸变率比较如图5-4所示。

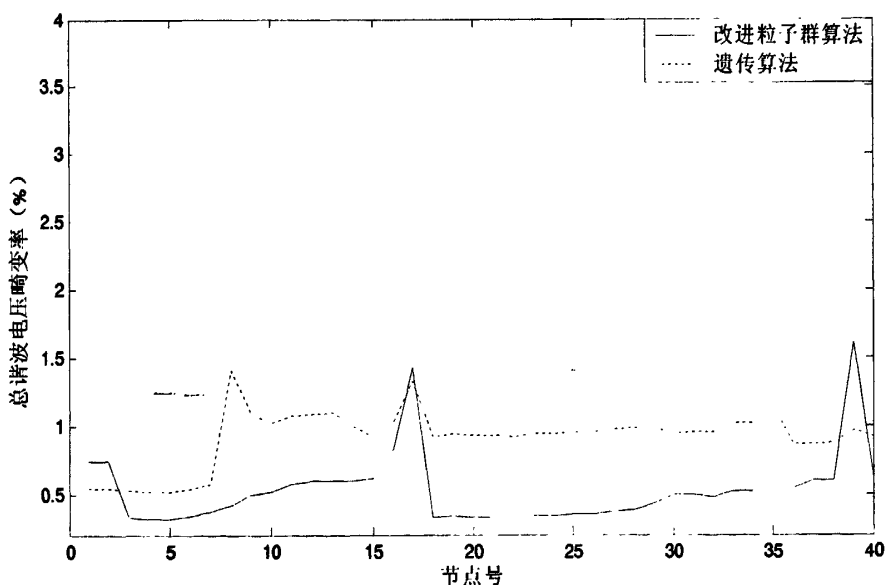


图5-4 两种算法配置无源滤波器后网络的总谐波电压畸变率对比

Fig5-4 Two algorithms after passive filter network configuration total harmonic voltage distortion compared

由图 5-4 可以看出, 经过改进粒子群算法优化配置无源滤波器后, 大多数节点的谐波畸变率比遗传算法的小, 只是在个别点上, 遗传算法配置无源滤波器后的谐波畸变率比改进的粒子群算法的大, 因此改进的粒子群算法在治理的效果上也较优。

5.4 本章小结

根据前面章节的分析, 以油田采油厂一条实际配电线路为算例, 计算了电网各节点的谐波参数和优化配置的无源滤波器参数, 对滤波结果进行分析, 将本文方法与遗传算法进行了比较, 说明本文方法的正确性。

总结与展望

1 总结

目前配电网中谐波畸变越来越严重,本文在总结了滤波器优化配置现状的基础上,深入研究了电网中普遍使用的无源滤波器参数设计及优化配置方法。以此为基础,确定在配电网中装设无源滤波器进行谐波治理。在无源滤波器优化配置时,建立了完整的、合理的目标函数,在满足各项要求的前提下求解滤波器的参数。现对本文研究的内容总结如下:

1、研究了滤波器无源滤波器的基本结构和影响滤波其性能的相关参数,且剖析了单调谐和高通滤波器的性能参数,包括谐波阻抗、品质因数及高通滤波器的截止频率和功率损耗等。

2、通过研究配电网谐波产生的机理,建立了各元件的谐波等效模型和电网中的谐波源模型,将基波潮流和谐波潮流分离迭代,实现了基波潮流和谐波潮流的解耦,求解谐波潮流,以对网络的谐波畸变状况进行分析。

3、综合考虑滤波器安装位置、安装类型、安装组数及滤波器参数,在满足滤波要求和安全运行的条件下,建立了配电网滤波器优化配置的数学模型,使滤波器的投资最少,达到谐波治理的目的。

4、在对比研究配电网滤波器最佳配置位置选择方法的基础上,研究了模糊集中决策理论,采用基于模糊决策网络固有结构方法,来确定滤波器最佳安装位置。

5、改进了基本粒子群算法,应用于配电网的滤波器优化配置,经过滤波器优化,使配电网谐波水平得到了较大改善,并与遗传算法的结果进行了比较,实验表明本算法在稳定性和收敛速度方面较优,证明本算法的正确性。

2 本文的创新点

采用基于模糊决策网络固有结构理论,寻找滤波器配置最佳位置。首先通过网络固有结构搜索到系统中对谐波电压灵敏的点集合,即滤波器安装的候选节点,再运用模糊决策的思想结合候选节点,找到滤波器安装的最佳位置。将遗传算法中复制的思想融入改进粒子群算法,限制电网的谐波电压畸变,达到网络的滤波要求。

3 展望

本课题在以下方面还可以进一步深入研究：

1、在电压等级较高的情况下，目标函数的建立，除了考虑经济效益，还应考虑谐波功率损耗，将线路中流动的谐波功率损耗累加在内目标函数中，使滤波器经济效益的数学模型更加完善。

2、电网中经常出现三相不对称的情况，在滤波器优化配置时，考虑在三相不对称条件下运行的约束。

3、对粒子群算法的改进，在不降低效率的前提下可以考虑合成算法，如借鉴智能进化或与模拟退火进行混合，将其应用到滤波器的优化配置中，将成为今后的研究方向之一。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 王跃. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 140-166
- [2] 林志清. 基于网络固有结构法的多谐波源配电网滤波装置的分阶优化研究[D]. 四川大学硕士学位论文, 2006
- [3] 纪震, 廖惠莲, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 16-19
- [4] W.M. Grady, M.J.A. Samotyj, A.H. Noyala. Minimizing Network Harmonic Voltage Distortion with an Active Power Line Conditioner[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, V6(4): 1690-1697
- [5] Richards, G.G. Yang, H. Distribution System Harmonic Worst Case Design Using a Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3A)
- [6] 祝典. 基于非支配遗传算法的无源滤波器优化设计[D]. 华北电力大学硕士学位论文, 2008
- [7] A. Rerizzi, C. Bovo. The Use of Genetic Algorithms for the Localization and the Sizing of Passive Filters[J]. Harmonics and Quality of Power. Ninth International Conference, 2000, 1: 19-25
- [8] 李群. 多谐波源网络滤波器最优配置的分级梯阶遗传算法[J]. 电网技术, 1997, 21(4)
- [9] 杨文字, 刘健, 余健明. 改进的自适应遗传算法在配电网谐波抑制中的应用[J]. 继电器, 2004, 32(4A): 24-27
- [10] 翁利民, 王渺. 基于改进型遗传算法的多谐波源配电网的谐波分析[J]. 电力情报, 2000: 21-24
- [11] 张丽莹, 杨洪耕, 刘亚梅. 基于固有结构理论的集中滤波器配置[J]. 现代电力, 2008(4): 42-46
- [12] 徐欣梅, 李妍, 熊信良, 吴耀武. 基于 PSO 考虑谐波影响的补偿电容器优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 26-29
- [13] 李习武. 配电网的无源滤波器的优化配置的研究[D]. 中国石油大学硕士论文, 2008
- [14] 肖建宏. 基于混沌算法的无源滤波器参数优化设计[D]. 湖南师范大学硕士论文
- [15] 祝典. 基于非支配遗传算法的无源滤波器优化设计[D]. 华北电力大学硕士学位论文, 2008

- [16] 夏道止,沈赞坝. 高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M].北京: 水利电力出版社, 1994:64-71
- [17] 熊芝耀. 高压直流输电系统中的谐波及其抑制方法的研究[D].湖南大学硕士论文, 2007
- [18] 肖湘宁,徐永海. 电力系统谐波及其综合治理[J].中国电力, 1998,31 (4): 59-61
- [19] 许邈, 蔡维, 李学信. 地铁供电站高次谐波滤波兼无功补偿装置的设计[J].华北电力技术, 2002,12
- [20] 罗伟原. 基于粒子群改进算法的无源电力滤波器优化设计[D].湖南大学硕士论文, 2009
- [21] 王军. 带分布式发电的配电网谐波研究[D].中国科学院电工研究所硕士学位论文,2006
- [22] 王华. 无源电力滤波器参数设计的多目标优化研究[D].哈尔滨工业大学硕士论文,2006
- [23] 彭协华. 基于遗传算法无源电力滤波器的优化设计[D]. 四川大学硕士学位论文, 2004
- [24] 陈珩.电力系统稳态分析[M].北京: 中国电力出版社, 2007: 82-102
- [25] Willian.F.Tinney,Clifford.E.Heat.Power Flow Solution by Newton's Methord[J].IEEE Transactionson Power Apparatus And Systems,1967,86(11):1450-1459
- [26] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M].北京: 高等教育出版社, 2007: 44-46
- [27] 马瑾, 徐建源, 王胜辉, 林莘. 辐射状配电网的潮流计算[J].沈阳工业大学学报, 2004,2,26 (1)
- [28] 翁俐民. 配电网谐波产生的机理、危害及滤波装置结构分析[J]. 电力电容器, 2004 (6)
- [29] 吴竞昌, 孙树勤, 宋文南, 曲涛. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 58-61
- [30] 阿里利亚加等编; 容健纲,张文亮译. 电力系统谐波[M]武昌: 华中理工大学出版社, 1994: 24-28
- [31] 高鑫. 基于改进自适应遗传算法的配电网滤波装置优化配置[D].西安理工大学硕士学位论文,2003
- [32] 王星华, 余欣梅. 谐波潮流建模及求解算法研究综述[J].电气应用, 2008,27 (2)

- [33] Lo. K. L, Goh. K. M. Harmonic analysis for power networks[J].Electric Power Systems Research,1986,10:189-203
- [34] 赵勇, 张涛, 李建华, 夏道止. 一种新的谐波源简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2002 (4): 46-47
- [35] 许克明, 徐云, 刘付平. 电力系统高次谐波[M]. 重庆大学出版社, 1990
- [36] 陆秀玲, 周腊吾, 张松华, 曹才开. 无源滤波器多目标优化[J].高电压技术, 2007,12,33 (12): 177-179
- [37] 中国国家标准 GB/T14549—93: 电能质量 公用电网谐波. 北京: 中国国家标准出版社, 1994
- [38] 彭协华, 张代润, 朱代祥. 基于遗传算法无源电力滤波器的优化设计[J].电力电容器, 2004, (1): 30-31
- [39] 王艳松, 李强, 李习武. 油田配电网的谐波分析与集中治理[J]. 中国石油大学学报, 2008 (4): 148-150
- [40] 林志清, 秦东, 杨洪耕. 基于灵敏度分析的网络固有结构理论的应用研究[J].四川电力技术, 2005,1: 15-18
- [41] Russo A,Caramia P,Varilone P.The Inherent Structure Theory of Network for Power Quality Issues[A].Power Engineering Society Winter meeting[C],IEEE 2001,1:176-185.
- [42] Carpinelti G, Russo A, Russo M,Verde P. The Inherent Structure Theory of Networks and Power system Harmonics[J].IEEE Proc.-Gener.Transm.Distrib.1998,145(2):123-132.
- [43] Laughton,M.A.,El-iskandarani,M.A.The Structure of Power Network Voltage Profiles[A].Prceedings of 7th PSCC[C],Lausanne,1982:845-851
- [44] Resende,J.W.,Samesima,M.A.The Structure Theory of Networks and Admittance Matrix Sparsity Relationship[A].Proceedings of 10th ICHPQ[C],Janeiro:Brazil,2002:23-28
- [45] 李洪兴. 模糊数学[M].北京: 国防工业出版社, 1994.
- [46] 李景杰, 陈国群. 模糊意见集中决策方法及应用研究[J].商丘师范学院学报, 2005,4,21 (2): 76-77
- [47] 吴启迪,汪镭. 智能微粒群算法研究与应用[M].南京: 江苏教育出版社, 2005:
- [48] 康琦. 微粒群优化算法的研究与应用[D].同济大学硕士学位论文, 2005
- [49] 李宁, 付国江, 库少平. 粒子群优化算法的发展与展望[J].武汉理工大学学报, 2005,27 (2): 26-28

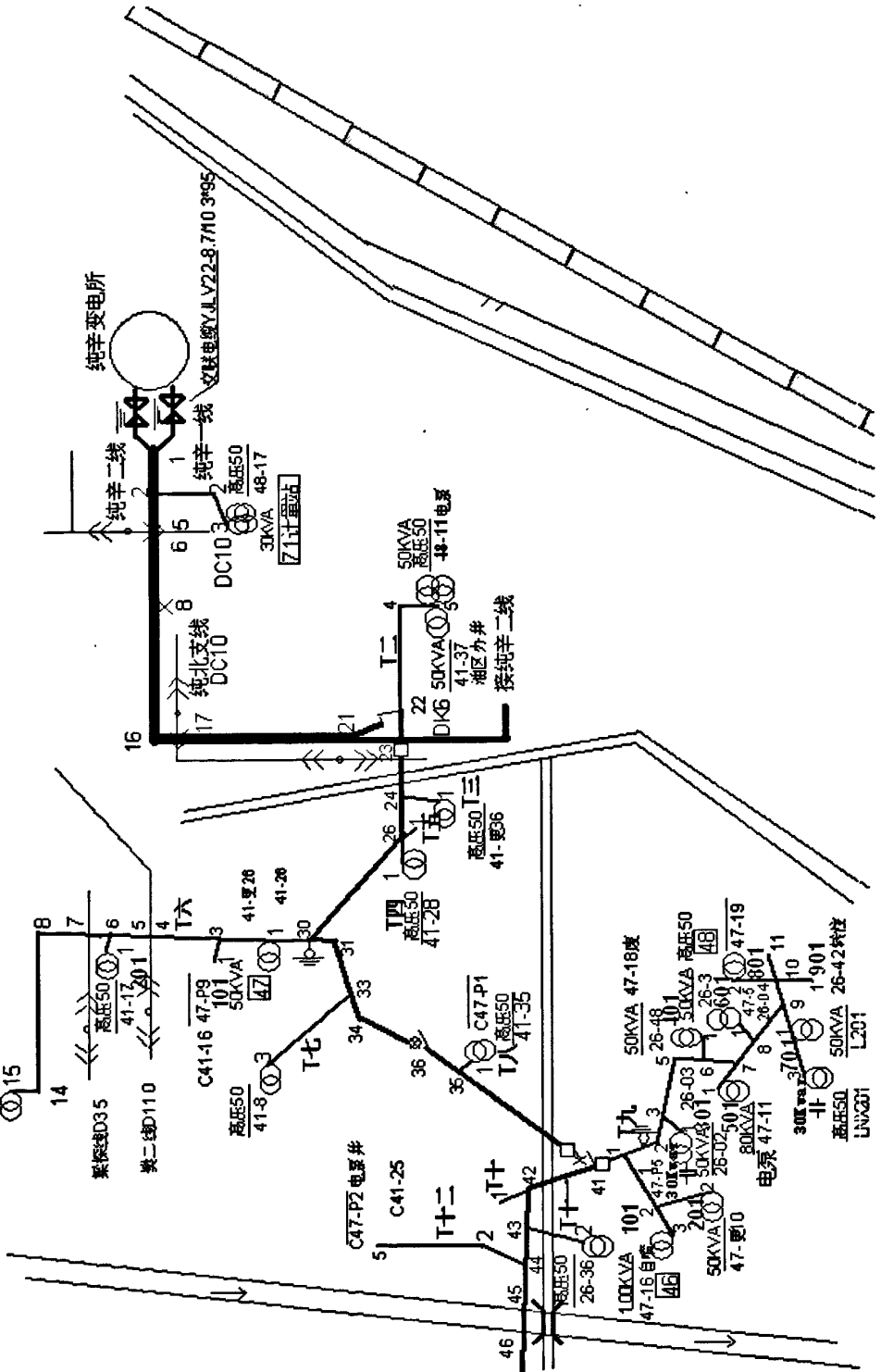
- [50] Shi Y, Eberhart RC. A modified particle swarm optimizer[J]. Proceedings of the 1998 conference on Evolutionary computation ,Anchorage, 1998
- [51] Kennedy J.The Particle Swarm social adaptation of knowledge.In:proc of IEEE int conf on Evolutonary Computation. Indianapolis, 1997,303-308
- [52] Van den, Bergh F. An Analysis of Particle Swarm Optimization; [Ph D dissertation]. Computation Science: Univ of Pretoria,2002:431-453
- [53] 任子辉, 王坚.加速收敛的粒子群优化算法[J].控制与决策, 2011,2,26 (2): 201-206
- [54] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995.
- [55] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Proceedings of Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995.
- [56] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J].中国工程科学, 2004 (5): 87-94
- [57] 熊信银,吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M].武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 31-62

附录 1

纯梁采油厂纯辛一配电路理信息图

说明：主干导线截面LGJ-70；分支导线截面LGJ-50。

高压50
电源 C53



致谢

值此论文完成之际,谨向我的导师刘润华教授致以最诚挚的敬意和感谢。导师严谨的治学风范,活跃的学术思想,诲人不倦的态度,高度的敬业精神,使我终身难忘,三年来对我工作方法上的教诲和各方面的关怀使我受益终生,此项研究工作中自始至终得到了刘润华老师的指导、帮助,从论文的选题方向、研究的规划进程、直至论文的文字细节,刘老师都倾注了大量的心血。我所取得的每一步进展都凝聚着导师辛勤的汗水。

在论文的撰写过程中,本实验室的同学和周围的朋友对我的课题研究也给予了极大的帮助,提出了许多宝贵的建议。实验室团结友爱,积极进取的学术氛围,使我在良好的学术氛围中度过了研究生生活。在此向他们以及所有关心和帮助过我的老师、同学致以深深的谢意!

在课题研究过程中,胜利油田纯梁采油厂提供了配电网现场数据,在此表示特别感谢。

此外,还要感谢我的父母,感谢他们对我的养育之恩和长久以来对我的支持和关爱,没有他们默默无闻的奉献和支持,就没有我的今天,在此对他们表示深深的谢意!

最后,向在百忙中抽空来评阅和评议我硕士论文的老师表示深深的感谢!