

华北电力大学

专业硕士学位论文

风光水机组参与 AGC 协调优化控制策略

Coordinated and Optimized Control Strategy of Wind or Photovoltaic and Hydropower Generating Units Participating in AGC

闫凯璐

2022 年 5 月

国内图书分类号：TM74

学校代码：10079

国际图书分类号：621.3

密级：公开

专业硕士学位论文

风光水机组参与 AGC 协调优化控制策略

硕士研究生：闫凯璐

导师：刘崇茹教授

企业导师：李胜男教高

申请学位：工程硕士

专业领域：电气工程

培养方式：全日制

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2022 年 5 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM74
U.D.C: 621.3

Thesis for the Professional Master Degree

**Coordinated and Optimized Control Strategy of
Wind or Photovoltaic and Hydropower Generating
Units Participating in AGC**

Candidate:	Yan Kailu
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Enterprise Mentors:	Prof. Li Shengnan
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality Field:	Electrical Engineering
Training Mode:	Full-time
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2022
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

在环境问题严峻和能源面临枯竭的当下，新能源发电的大范围大容量投入，一方面缓解了环境压力，但由于新能源的间歇出力和随机波动，风电、光伏在并网时利用效率较低，给新结构下的电网带来了不小的挑战。新能源的渗透影响着电力系统的惯性，制约了系统的调频能力，进而对系统稳定安全的运行状态产生了威胁。因此，如何充分发挥新能源的优势，利用现代电网高比例新能源的特征，将新能源调频能力纳入现有的调频体系中，寻找到包含新能源的新的频率控制方法，是大势所趋。因此，本文主要对风、光新能源协同水电机组参与电网 AGC 的策略进行了分析，并针对各机组参与 AGC 的调频指令进行优化设计。

本文的主要工作包含以下几方面内容：

首先，分析了新能源有功-频率控制特性，从系统惯性和下垂系数两个参数出发，结合频率初始变化率、频率最低值、频率稳态值三个指标，分析了新能源接入对电网频率的消极影响；根据新能源与水电交互的特性、风电和光伏频率控制方法阐述了新能源参与电力系统频率调节的潜力。

其次，本文提出一种考虑新能源波动和系统功率偏差的 ACE 计算方法，并在此基础上分析了两区域系统中 AGC 的功率指令分配策略，其中包括新能源机组与同步机组、各场站内部机组的调频因子分配方法，重点考虑了新能源机组参与 AGC 的门槛制约，基于 MATLAB/SIMULINK 仿真环境设计了考虑新能源机组的两区域 AGC 模型。仿真结果表明新能源通过合理的控制具有调频能力，可以改善水电机组因水锤效应而产生的频率波动情况，即新能源机组的加入减轻了系统二次调频的压力，进而提升系统整体的调频效果。

最后，为进一步改善新能源参与 AGC 的调节性能，使机组运行在更加高效、经济和安全的工作环境中，合理优化了二次调频的参与因子。本文设计了考虑调频速度、水电穿越振动区次数、调频成本等三个目标的优化模型，结合各机组运行的约束条件，通过 Pareto 理论并运用多目标粒子群算法，对机组参与 AGC 的功率指令进行优化完善，在 IEEE 标准两区域模型中加入新能源机组，验证所提方法的合理性。仿真表明本文提出的优化策略能更合理有效地利用新能源的调频能力，提升系统的动态响应性能。

通过理论分析和仿真验证，本文提出的风光水机组参与的 AGC 协调优化模型不仅可以激发新能源参与 AGC 的潜能，还兼顾了水电机组的调节性能，有效抑制

系统频率振荡，提升系统频率质量。

关键词：新能源；水电机组；AGC；多目标粒子群算法；协同优化

Abstract

At a time when environmental problems are severe and energy is facing depletion, large-scale investment in new energy power generation relieves environmental pressure on the one hand, but due to the intermittent and fluctuating output of new energy, the utilization rate of wind power and photovoltaics when connected to the grid is not high, giving the grid under the new structure has brought a lot of pressure. Due to the influence of the inertia of the power system, the frequency regulation capability of the power system has been reduced, threatening the safe and stable operation of the power system. Therefore, how to take advantage of new energy sources, and take advantage of the high proportion of new energy characteristics of modern power grids, incorporate new energy frequency regulation capabilities into the existing frequency regulation system, and find new frequency control theories with new energy sources, is the general trend. Therefore, this paper mainly analyzes the strategy of new energy cooperating hydropower units to participate in the automatic generation control of the grid, and optimizes the design for the frequency regulation command of the units participating in AGC.

The main work of this paper includes the following contents. First, the active power-frequency control characteristics of new energy are analyzed, and the negative impact of new energy on the frequency of the power grid is analyzed based on the initial frequency decrease rate, the lowest frequency, and the steady-state frequency. The characteristics of the interaction between new energy and hydropower, and the frequency control methods of wind power and photovoltaics illustrate the potential of new energy to participate in the frequency regulation of the power system.

In this paper, a calculation method of ACE considering the fluctuation of new energy and system power deviation is proposed, and on this basis, the power command allocation method of AGC in the two-region system is analyzed, including the power command allocation between new energy units and traditional units and the new energy units. The internal frequency regulation factor allocation method is based on the MATLAB/SIMULINK simulation environment to design a two-area AGC model considering new energy units. The simulation results show that new energy has the ability to regulate frequency, which can improve the frequency fluctuation in the case of pure hydroelectric units, that is, the addition of the new energy unit reduces the pressure on the secondary frequency regulation of the system and improves the overall frequency regulation effect.

Finally, in order to further enhance the ability of new energy to participate in AGC and make the operation of the unit more economical, safe and efficient, the participation factor of secondary frequency regulation is reasonably optimized. In this paper, an

optimization model is designed using three objective functions of frequency regulation speed, the number of times the hydropower unit passes through the vibration zone, and the frequency regulation cost. Combined with the constraints of each unit's operation, through Pareto theory and the use of multi-objective particle swarm algorithm, the frequency regulation of the units participating in AGC is carried out to optimize the instructions, the traditional IEEE standard two-region model is improved, and the rationality of the proposed method is verified. It shows that the optimization strategy proposed in this paper can more effectively utilize the frequency regulation capability of new energy sources and improve the dynamic response capability of the system.

Through theoretical analysis and simulation verification, the AGC coordination optimization model proposed in this paper can not only stimulate the potential of new energy to participate in AGC, but also take into account the regulation performance of hydroelectric units, effectively suppress system frequency oscillation, and improve system frequency quality.

Keywords: new energy, hydroelectric unit, AGC, MOPSO, co-optimization

目 录

摘要	I
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势	2
1.2.1 频率稳定问题发展现状	2
1.2.2 水电机组参与系统调频的研究现状与发展趋势	3
1.2.3 风电机组参与系统调频的研究现状与发展趋势	4
1.2.4 光伏电站参与系统调频的研究现状与发展趋势	4
1.3 本课题的主要研究内容	5
第 2 章 新能源参与系统调频可行性研究	7
2.1 引言	7
2.2 新能源接入后对系统频率的影响机理	7
2.2.1 新能源接入对系统频率调节能力的影响分析	7
2.2.2 风电频率响应特性及其对电网频率的影响分析	11
2.2.3 光伏频率响应特性及其对电网频率的影响分析	13
2.3 新能源与水电交互影响机理	14
2.4 新能源参与电网调频潜能分析	16
2.4.1 风电参与频率调节能力分析	16
2.4.2 光伏参与频率调节能力分析	16
2.5 本章小结	20
第 3 章 新能源参与电网 AGC 策略	22
3.1 引言	22
3.2 传统二次调频控制策略	22
3.3 新能源参与 AGC 控制策略	23
3.3.1 考虑机组出力偏差的 ACE 计算方法	23
3.3.2 新能源与同步电厂调频因子的确定	24
3.3.3 各场站内部调频因子的确定	25
3.3.4 两区域系统多源 AGC 协同控制模型	26

3.4 算例分析 27

 3.4.1 AGC 调频模型 27

 3.4.2 新能源协同参与 AGC 仿真验证 29

3.5 本章小结 32

第 4 章 风光水机组参与 AGC 协同优化策略 33

 4.1 引言 33

 4.2 风光水机组协调优化模型 33

 4.2.1 目标函数 33

 4.2.2 约束条件 34

 4.3 多目标优化问题求解算法 35

 4.3.1 基于 Pareto 最优解的多目标优化概述 35

 4.3.2 多目标粒子群算法概述 36

 4.4 算例分析 38

 4.4.1 AGC 模型基本资料 38

 4.4.2 算例设置及求解 39

 4.4.3 基于 MOPSO 的优化结果分析 40

 4.5 本章小结 42

第 5 章 结论与展望 43

 5.1 结论 43

 5.2 展望 43

参考文献 45

致 谢 50

作者简介 52

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

新能源发电技术的变化日新月异，我国电网已经进步成为规模更大、结构及工况更丰富的交直流混合电网，为使得环境更加绿色可持续，实现“碳达峰、碳中和”的双碳目标，能源结构转型已迫在眉睫。能源结构转型使得新能源在新型电力系统中的装机总量和占比与日俱增。据预测，我国风电、光伏将在 2060 年发展至 50 亿千瓦左右的装机规模，成为电量供应排头兵。但由于新能源的波动出力，挑战了系统的功率平衡和运行控制能力：新能源资源丰富时难以消纳，常规电源空间缩减，同时不稳定的新能源提升了电网规划设计、生产运行方面的难度。但是安全、经济和环境三方面不可兼得，这就需要在实际运行工况中相互协调。

截至 2019 年底，云南省电源装机情况如表 1-1 所示，装机总量为 9594.6 万千瓦。2015 年底，“8 交 8 直”的输电通道在南网落地产生，直流通道可以输送近七成到八成的电力资源，强直弱交特征非常典型，主网运行的安全稳定问题变得十分复杂^[1-2]。直流输送的功率日渐提升，电网结构越来越复杂化，运行要求也随之提高，若直流发生故障，给电网带来的冲击可能引发系统失稳。作为标准的多直流馈入的受端电网，由于锦苏直流发生双极闭锁，华东电网在“919 事故”中的频率一度跌至近十年的最低点 49.56Hz，给电网的运行带来了警示^[3-4]。南网所提出的异步互联在一定程度上可以在优化电网结构、提高交直流影响、大容量直流闭锁造成的系统功角失稳、多回直流持续换相失败造成的系统失稳等方面产生积极影响，即云南电网成为独立的送端电网，同南网主网进行异步互联^[5]。

表 1-1 2019 年云南省电源装机情况 (单位：万千瓦)

项目	装机容量	占比
总装机	9594.6	—
一、水电	6873	71.63%
1、干流水电	4524	—
2、中小水电	2349	—
二、火电	1240	12.92%
三、综合利用	268.7	2.80%
四、新能源	1212.9	12.64%
1、风电	863	—
2、光伏	349.9	—

作为国家清洁能源西电东送的基地云南，一方面，云南电网的水电占比仍然极高，从表 1-1 可以看出，2019 年水电装机占比高达 71.63%；另一方面，电网的典型特征之一就是新能源占比很重。大量的清洁能源将部分传统能源取而代之，系统整体惯性随之减小，进而系统整体的频率调节能力受到了严重影响，动摇了电力系统的稳定状态；同时，由于新能源大规模发电，电网存在典型的电力电子化特征，多时间尺度的频率问题随之而来。同时，异步联网后的云南电网失去了南网主网的支撑，系统惯量进一步减小，云南电网面临着新的频率稳定问题。其一，南方大同步电网分解为两个规模缩小的小同步电网，即云南电网和主网，其频率稳定性随之下降；其二，外送直流闭锁后云南电网富余出了电能，一部分通过直流频率限制控制（Frequency Limiting Control, FLC）调制迁徙到其他直流通道上，另一部分吸收进了云南电网，导致其频率波动。新能源间的稳定协调控制问题严峻，需要刻不容缓地提出新能源频率稳定控制的新理论和新技术，擢升含大规模新能源的新型系统的稳定运行能力。

基于云南电网的现状，考虑到水电占比大，加上新能源正在以燎原之势进行发展，新能源协同水电机组参与电网调频成为维持电网频率安全的迫切需求。为此，本文旨在研究与挖掘新能源的调频能力，分析新能源大量接入如何对电力系统频率产生影响，搭建新能源和水电机组的频率控制模型，研究新能源协同水电机组进行二次调频 AGC 的控制技术，以期提升风、光新能源并网运行能力，改善系统的动态特性。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 频率稳定问题发展现状

新能源的大规模接入，加上部分同步机组的退出，减小了系统的惯性，因此系统调频能力降低，电网稳定运行受到了挑战。云南电网在异步后改变了网架结构，机组初始控制方式和相关参数已不能很好地配合新的运行模式，机网的不协调运行也会拉低电网的调节能力，造成严重事故^[6]。同时，直流系统在故障后可能会引起有功功率消纳不及时，电网就会存在严重的频率稳定问题。

电力系统频率是否稳定可以反映电力系统的运行情况。电网受扰时，系统有功功率失衡，改变了原本的有功潮流分布，若频率大幅波动可能引发继保装置动作，大范围的停电事故也是有可能发生的。某次基于云南电网的大扰动实验的 PMU 数据表明，水电机组在异步后出现了新的调频问题、直流故障造成的高频事故并不少见，而且各区域的频率变化存在显而易见的时空分布特性。

云南电网的水电相对多，因为水电机组出力大、调节快，频繁开停消耗较少

的能量，在电网中既可以进行调频调峰，还可承担备用容量^[7]。因此，水机组是否存在良好的调频能力，将影响着电网运行情况是否稳定。但水轮机的水锤效应会使得水电在调频时减慢其响应速率且具有反调的特点，如图 1-1 所示，这将有损于云南电网的频率稳定^[8]。

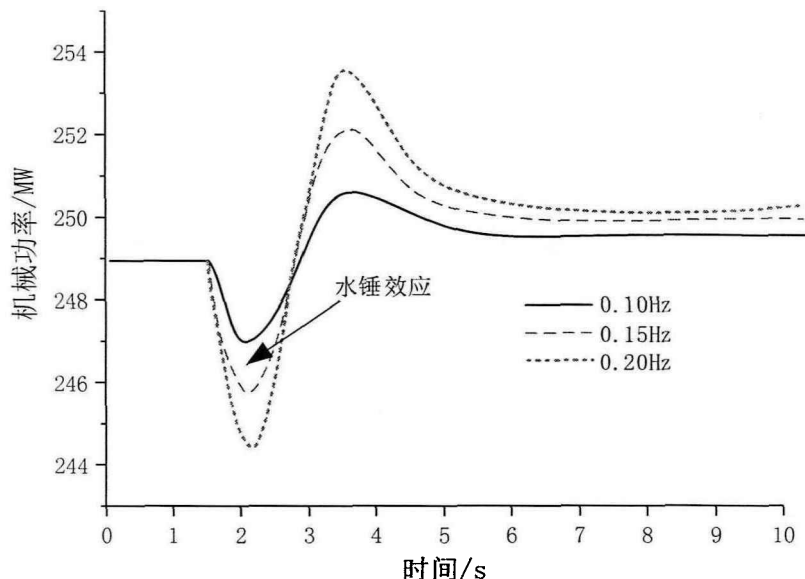


图 1-1 水锤效应

目前，云南的新能源发电量占比最高已过半。若受自然条件影响大的新能源机组不参与频率调节，电网惯量减小的同时会迅速造成系统功率不平衡，电网频率的静态与动态响应特性变差^[9]。

除此以外，AGC 主站的超调也会导致频率发生变化。系统经一次调频后若要使频率恢复至额定，仍要进行无差调节的二次调频进行配合，主要是依靠自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）。频率波动试验结果显示，异步运行系统在小扰动发生时，主站侧的 AGC 到达 100MW 的单步调节量时，频率就会发生振荡。

1.2.2 水机组参与系统调频的研究现状与发展趋势

水机组启停和并网快、效率高，调度方便，可负责调峰，也可以作为事故备用机组。水机组可在几秒钟的时间内增减负荷，在几分钟之内从开机实现满发，可实现额定容量三成以上的增荷速率，调荷幅值还能近似等于额定容量，几乎没有损失能源。水机组的调频效果，与机组功率控制模式息息相关，还受到调速器的运行方式的影响^[10]。张江滨^[11]、孔德宁^[12]分别通过数值模拟和实际试验，研究并改善了水机组的调频系统。但若水电站的输水系统较长，会造成水流惯性大，机组调频性能变差，改变 PID 控制参数可以改变调节时间，但也会影响到机组的稳定性，周永杰在研究中增大了频率死区，但在电网频率变化率大的时候，

过度增大死区又会影响水电机组调频的有效性，更加难以及时支持系统功率^[13]。

1.2.3 风电机组参与系统调频的研究现状与发展趋势

在风电占比高的系统中，由于风电场输出功率不稳定，原系统潮流、输送功率和惯量发生变化，进而会恶化电网的有功平衡和频率稳定^[14]。当风电在薄弱的独立电网并网运行时，有功调节能力有限，更凸显了电网频率稳定问题^[15]。

系统与双馈风机的功率解耦，电网频率与转速的解耦，都会导致系统频率波动时，机组便不能迅速支撑系统的频率响应，换言之，机组的固有惯量此时成为了电网的“隐藏惯量”，电网有功缺额时，频率就会迅速大幅下降，系统的频率不再稳定^[16]。大量的风电接入会更加深刻地影响系统的频率特性，原始的调节方法就会在一定程度上失效^[17-18]。对惯性时间常数的值，同步机组大约为 2-9s，而风电机组为 2-6s，由此而言，风电机组可以借“隐藏惯量”的优势辅助电力系统的频率调节。

目前国内外学者在风电参与系统调频方面的研究已经比较丰富，也有很多成果。文献[19]研究了将超速与变桨结合进行调频的方法，即在减载运行时，利用转子增速加上控制桨距角，预留出有功备用进行调频。为释放风机转子的动能，文献[20]发表了两种虚拟惯性控制方法，给电网的动态频率提供支持。文献[21]量化了机组调频潜能与风速的关系，由此提出基于时序协同的风电场频率控制策略，可以改善风机参与调频时的负面效果。文献[22]加入超导储能系统，利用模糊神经网络，提出了风机与超导储能联合系统的频率控制策略，改善系统的频率。文献[23]通过虚拟惯性控制，结合桨距角的频率控制方法，设计出了新型复合频率调节方法，可以有效降低系统频率稳态偏差。文献[24-28]提出在正常运行时保留部分有功输出，作为备用功率。当系统频率下降，再变化桨距角或功率来提升输出以参与调频。文献[29]将频率功率控制模块加入现有双馈风机的控制系统，改善机组的风能利用率，迅速响应系统频率改变。文献[30]以永磁直驱风机作为研究对象，对比了新提出的频率-转速联合控制策略与传统的频率控制策略，表明新提出的策略能够增大系统惯性，缓解频率波动。文献[31-36]研究了利用 DFIG 转子中保留的动能，来进行系统调频。

1.2.4 光伏电站参与系统调频的研究现状与发展趋势

目前在光伏电站是否可以改善系统频率变化方面也有很多研究。现有资料大部分是面对微网或区域电网的光伏能否参与调频进行分析，可体现在这几方面：

(1) 参照常规机组的功频特性，对光伏电站的功频特性进行拓展，以研究其调频能力^[37-44]；(2) 加入储能系统以改变系统频率响应^[45-50]；(3) 从负荷的随机特点

出发,利用需求侧管理技术^[51-53],动态平衡系统功率,维持频率的稳定;(4)采用虚拟同步技术,仿照同步发电机的频率调整特性,模拟光伏的调频性能^[54-61]。以此来看,针对大电网的光伏辅助调频方法研究不多。

现有技术中,光伏电站大部分工作在最大功率点,但此时没法预留有功备用,其输出功率不能进行调节,因此便不能参与频率的调整^[62]。若减载运行中的光伏电站,其实际工作电压略大于最大功率点的电压,就可以保存一定的功率备用,此时光伏电站就具备了一定的调频能力^[37-38]。

文献[39]利用功率-频率函数,研究了抑制光伏并网时频率偏差的方法。定下垂系数控制方法存在着局限性,据此,文献[40]在过频和低频两种工况下,基于双级式光伏并网系统,研究了整定下垂控制参数的不同方法,以改善光伏调频能力。

为了充分利用光伏发电为电力系统提供频率支撑,必须考虑到常规调频、备用容量等其他约束是否会对光伏系统的调频能力产生影响。文献[41]对比了纯光伏、光伏+常规机组进行频率调节这两种情形下的光伏减载运行特点。文献[42]提出了一种考虑频率动态改变和光伏调频容量制约的组合模型,用来加强光伏的调频能力。文献[43]基于电网频率的变化,采用变减载率,提出了一种新的光伏运行的控制策略,使光伏可以更灵活地适应系统频率变化。

1.3 本课题的主要研究内容

本文以风光水联合系统为研究对象,研究了新能源协同水电机组参与电网 AGC 的协调优化控制模型。全文共分为 5 个部分,每章节内容如下:

第一章以云南电网为背景,介绍了目前高新能源渗透率下电网所面临的频率问题,以及将新能源调频能力纳入现有电网调频体系的必要性。其次,针对这一现实问题,分别从水电机组、风电机组、光伏电站参与调频等方面阐述了国内外研究现状。

第二章论述了新能源参与系统调频的可行性。首先分析了风电、光伏的有功-频率特性以及从频率初始变化率、最低点频率、稳态频率三个角度分析新能源渗透率对系统频率的影响;其次,从新能源与水电交互的角度分析了互补发电的可行性;最后论述了新能源参与系统调频的控制方法,验证了新能源的调频潜力。

第三章针对两区域系统分析了新能源参与 AGC 的控制策略。首先,提出了考虑新能源功率波动和系统功率偏差的 ACE 的计算方法,研究了新能源与同步机组的功率指令分配策略,接着引入新能源参与 AGC 的门槛值,以此来评估该机组是否具有参与 AGC 的条件,并提出新能源机组之间的调频因子分配策略,最后在 MATLAB/SIMULINK 仿真环境下建立了风光水机组参与调频的两区域 AGC 模型,验证了不同新能源渗透率下参与系统 AGC 策略的有效性。

第四章提出风光水机组参与 AGC 的协调优化方案。建立了包含风光水机组的优化模型，其中目标函数包括调频速度、水电机组穿越振动区次数和调频成本，约束条件包括系统功率平衡约束、水电和新能源机组的出力约束、水电机组爬坡速率约束和水电机组振动区约束，基于 Pareto 理论通过多目标粒子群算法进行优化决策，获得各机组分配系数，最后验证得出所提优化模型和策略比传统的等比例分配方法具有更有效可行的调节效果，系统的动态特性更好。

第五章总结了本文的研究内容和成果，并基于不完善之处对未来研究方向进行展望。

第2章 新能源参与系统调频可行性研究

2.1 引言

当今环境和资源面临着非常严酷的问题和考验，建设以新能源为主体的新型电力系统的提出，使得风、光高渗透率已成为当下电网的主要特征之一。高比例的新能源缩减了系统的惯性，弱化了系统的频率调整能力，会造成电网不能安全稳定运行。因此，将新能源纳入现有的调频体系势在必行。基于上述背景，本章分别分析了新能源接入后对系统频率的影响机理、新能源与水电交互影响机理，并在此基础上分析了新能源参与系统调频的原理，以期最大限度地发挥新能源在调频方面的潜力，缓解常规机组的调频压力。

2.2 新能源接入后对系统频率的影响机理

2.2.1 新能源接入对系统频率调节能力的影响分析

新能源发电若要接入电网，离不开电力电子装置，在一次能源允许的条件下，新能源发电的输出功率的大小和形式能够随即改变。现实中新能源发电影响系统频率主要体现在以下三方面：

- 1) 新能源出力不稳且不好预测，其发电输出功率受制于这种特性，很难持续维持稳定；
- 2) 由于电力电子装置的存在，实现了有功和频率的解耦，不易为电网提供转动惯量支撑以维持电网的稳定；
- 3) 新能源接入大电网的控制策略一般使用电流源控制，即给电网中输入恒定的有功功率，不进行电网调频。

基于上述现象，新能源的并入可以致使系统的阻尼、惯量变小，调频能力以及稳定裕度缩减，若继续依靠传统的同步机组控制频率，电网将不能继续保证频率的稳定。

原始系统中的惯性由各电机的转动惯量提供，但如今依靠电力电子设备接入电网的新能源机组，不仅没有发电机，同时缺少储能环节，理论上的转动惯量为零，惯性系数 H 也等效为零，加之若新能源发电系统不去调节系统的频率，其下垂系数倒数同样也为零。

等效化 n 台同步发电机，则该实际系统的 H 与下垂系数倒数表达式为式(2-1)和式(2-2)：

$$H_s = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_{Gi}}{\sum_{i=1}^n S_{Gi}} \quad (2-1)$$

$$K_v = \frac{1}{R} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} S_{Gi}}{\sum_{i=1}^n S_{Gi}} \quad (2-2)$$

式中 H_s ——原电网的等效惯性系数；

R ——原电网的等效下垂系数；

H_i ——第 i 台发电设备的惯性系数；

R_i ——第 i 台发电设备的下垂系数；

S_{Gi} ——第 i 台发电设备的发电容量。

根据上式，新能源对于系统频率的作用效果为零，即 $H_{re} = 0, 1/R_{re} = 0$ 。考虑新能源的并入，则系统功率可用式 (2-3) 表示：

$$S_G = S_{Gs} + S_{Gre} \quad (2-3)$$

式中 S_G ——系统总容量；

S_{Gs} ——同步发电设备容量；

S_{Gre} ——新能源发电设备容量。

此时新能源的渗透率为式 (2-4)：

$$\eta = \frac{S_{Gre}}{S_{Gs} + S_{Gre}} = \frac{S_{Gre}}{S_G} \quad (2-4)$$

接入新能源的新系统的惯性系数与下垂系数倒数为式 (2-5) 和式 (2-6)：

$$H'_s = (1 - \eta) H_s \quad (2-5)$$

$$K'_v = \frac{1}{R'} = (1 - \eta) \frac{1}{R} \quad (2-6)$$

式中 H'_s ——新系统的等效惯性系数；

R' ——新系统的下垂系数。

从上式可以看出，新能源比例增大，新系统的 H'_s 降低， R' 增加。 H_s 可以衡量系统惯性，其值越大表明系统的惯性越大； R 可以检验系统一次调频能力，其值越大表明调频能力越差。由此，新能源的并入会削弱系统惯性和调频效果。

下面将具体结合电力系统的频率指标（频率初始变化率、最低值、稳态值），分析新能源带来的影响。

假设系统为火电和新能源的机组组合，在系统功率扰动为 $\Delta P_a(t)$ 时，功率平衡表达式为式（2-7）：

$$[\Delta P_a(s) - \frac{1 + F_H T_R s}{R(1 + T_R s)}] \frac{1}{2H_s s + D} = \Delta F(s) \quad (2-7)$$

式中 F_H ——等值汽轮机高压缸的输出功率对总输出的占比；

T_R ——汽轮机再热时间常数；

D ——负荷调频效应系数。

简化后的频率偏差时域形式为式（2-8）：

$$\Delta f_{ave}(t) = \frac{R \Delta P_a(t)}{RD + 1} [1 + \alpha e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi)] \quad (2-8)$$

参数具体可以表示如下：

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - T_R \xi \omega_n + T_R^2 \omega_n^2}{1 - \xi^2}}, \quad \xi = \left[\frac{2H_s R + DRT_R + F_H T_R}{2(RD + 1)} \right] \omega_n, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{RD + 1}{2H_s RT_R}},$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}, \quad \phi = \phi' - \phi'' = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_d T_R}{1 - T_R \xi \omega_n} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{-\xi} \right)$$

下面针对频率初始变化率、频率最低值、频率稳态值三个指标具体分析新能源系统的频率特性。

（1）频率初始变化率

系统受干扰时，频率初始变化率 $\frac{df_{ave}(t)}{dt}$ （Hz/s）可以用来描述惯性响应能力，

系统频率偏差 $\Delta f_{ave}(t)$ 可用式（2-9）表示：

$$\Delta f_{ave}(t) = \frac{\Delta P_T(t)}{D} \left(1 - e^{-\frac{D}{2H_s} t} \right) \quad (2-9)$$

式中 $\Delta P_T(t)$ ——系统有功功率偏差。

当系统功率变化的瞬间，调速器不动作。此时的 $\Delta P_a(s) = \Delta P_T(s)$ 。因为

$\frac{df_{ave}(t)}{dt} = \frac{d\Delta f_{ave}(t)}{dt}$ ，则频率初始变化率为式（2-10）：

$$F = \left. \frac{df_{ave}(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\Delta P_T(t)}{2H_s} \quad (2-10)$$

由上式得出, F 只与 $\Delta P_r(t)$ 和 H_s 有关, 与 D 以及 R 都不相关。新能源机组不做调频机组时, 根据之前分析, F 将随着 H_s 的减小而增加。

(2) 频率最低值

最低点的频率反映出了频率变化中的最严重情况, 是作为参考依据来启动调速器以及整定低频减载。频率最低时有 $\frac{df_{ave}(t_{min})}{dt} = 0$, 即:

$$\frac{R\Delta P_a(t)\alpha}{RD+1} \times \left[-\xi\omega_n e^{-\xi\omega_n t_{min}} \sin(\omega_d t_{min} + \phi) + \omega_d e^{-\xi\omega_n t_{min}} \cos(\omega_d t_{min} + \phi) \right] = 0 \quad (2-11)$$

式中 t_{min} ——系统至频率最低值所需时间。

大规模新能源并网后, t_{min} 计算公式为式 (2-12):

$$t_{min} = \frac{n\pi - \phi'}{\omega_d} = \frac{1}{\omega_d} \tan^{-1} \left(\frac{\omega_d T_R}{\xi\omega_n T_R - 1} \right) \quad (2-12)$$

此时系统的频率最低值为式 (2-13):

$$f_{ave}(t_{min}) = 50 - \Delta f_{ave}(t_{min}) = 50 - \frac{R\Delta P_a(t)}{RD+1} \times \left\{ 1 + \alpha e^{-\frac{\xi\omega_n}{\omega_d} \tan^{-1} \left(\frac{\omega_d T_R}{\xi\omega_n T_R - 1} \right)} \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{\omega_d T_R}{\xi\omega_n T_R - 1} \right) + \phi \right] \right\} \quad (2-13)$$

由上式可以看出, H_s 和 R 发生变化时, ω_n 、 ω_d 、 ξ 等参数均会发生变化, 因此 H_s 和 R 均影响着系统频率最低值。

(3) 频率稳态值

频率稳定时, $\frac{d\Delta f_{ave}(t_{\infty})}{dt} = 0$, $\Delta f_{ave}(t_{\infty}) = c$ 。 c 是恒定频率, t_{∞} 是系统达到频率稳态的时间。大规模新能源并网后, 此时频率稳态偏差值 $\Delta f_{ave}(t_{\infty})$ 和频率稳态值 $f_{ave}(t_{\infty})$ 为式 (2-14) 和式 (2-15):

$$\Delta f_{ave}(t_{\infty}) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta f_{ave}(t) = \frac{R\Delta P_a(t)}{RD+1} \quad (2-14)$$

$$f_{ave}(t_{\infty}) = 50 - \Delta f_{ave}(t_{\infty}) = 50 - \frac{R\Delta P_a(t)}{RD+1} \quad (2-15)$$

由式 (2-15) 可知, 新能源的加入, $1/R$ 减小, 频率稳态值将随之降低。

综上所述, 大规模新能源的加入, 会占据部分传统机组的原有空间, 减弱系统惯性和调频性能。系统若受相同扰动, 频率初始变化速度加快, 若不考虑无差调节的 AGC, 系统频率稳态偏差就会更大。

2.2.2 风电频率响应特性及其对电网频率的影响分析

(1) 静态频率响应特性

整定风电机组的调差系数，可以获得类似于同步机组的静态频率下垂特性，但风电机组的调频减载备用随输入风速的不同而有差异，进而频率改变后的功率支撑量也会不一样。静态频率曲线可以描述各种风速下风机的调频效果，如图 2-1 所示。

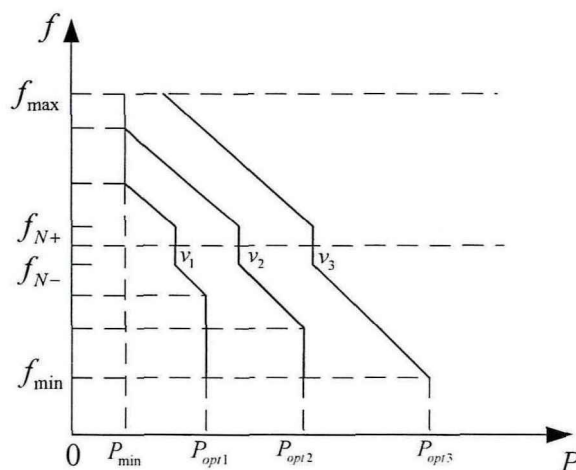


图 2-1 变速风机静态频率特性曲线

$f_{N-} \sim f_{N+}$ 为控制死区，当频率在这段区间内，不同风速下的风机工作在初始减载水平下，为频率变化时所进行的调频工作做备用容量的预留。 $d\%$ 为初始减载水平， $P_{opti} (i=1,2,3)$ 是不同风速的风机的功率最优值，正常情况下，机组输出功率为 $(1-d\%)P_{opti}$ 。

当频率跌破 f_{N-} 时，超出机组的调频能力，机组在最优功率点 P_{opti} 处工作，最大程度支持系统功率变化。

当频率上升大于 f_{N+} 时，风机跟随下垂曲线继续进行减载，削减为电网输送的功率，甚至可以恢复至并网开始的功率 P_{min} ，减小了频率上升时的功率差额。

(2) 动态频率响应特性

风机转子的转速和频率解耦，因此在较广泛的转速调节范围内，机组能够变速工作，而且，用电力电子变流器去进行有功功率控制，可以达到灵活、迅速的调节效果。将频差信号加入到风机的控制环节中，通过快速功率调控从系统中注入或吸收突然变化的有功，转子转速也能即刻响应，从而改变其旋转动能。风机转子运动方程为式 (2-16)：

$$P_m - P_e = J_w \omega_r \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2-16)$$

式中 P_m ——风机机械功率；

P_e ——风机电磁功率；

J_w ——风机固有惯量；

ω_r ——转子转速。

频率波动中，可被风机使用的旋转动能 E_{kw} 表达式为式 (2-17)：

$$E_{kw} = \int (P_m - P_e) dt = \int \frac{J_w \omega_r d\omega_r}{\omega_e d\omega_e} \times \frac{\omega_e d\omega_e}{dt} dt = \int J_{vir} \omega_e d\omega_e \quad (2-17)$$

式中 ω_e ——同步机组的电角速度；

J_{vir} ——风机虚拟惯量。

其中， J_{vir} 表达式为式 (2-18)：

$$J_{vir} = \frac{J_w \omega_r d\omega_r}{\omega_e d\omega_e} = \frac{\Delta\omega_r}{\Delta\omega_e} \times \frac{\omega_{r0}}{\omega_e} J_w = \lambda \frac{\omega_{r0}}{\omega_e} J_w \quad (2-18)$$

式中 λ ——转速调节系数；

ω_{r0} ——频率发生改变前的风机初始转速。

由上述分析，风机自身惯量、初始转速、转速调节系数都会影响到虚拟惯量。常规而言，风机转速调节范围大于系统频率改变范围，即 $\Delta\omega_r \gg \Delta\omega_e$ ，则变速风机可以拟化出的等效惯量远超出自身惯量，这种虚拟惯量可以更有效地支持系统，使得频率初期变化率降低，抬高频率最低值，进一步提高了系统的电能质量。

风机并网后系统频率是否稳定主要取决于以下几个因素：

1. 系统开机方式：这将影响到旋转备用的容量以及系统惯性。在电网发生故障而风电场被迫退出运行时，若惯性和备用容量值大，则能更加迅速地弥补系统功率缺额，进而系统受到的频率冲击就会变小。
2. 系统一次调频：也可以说是电源的调速系统。当系统频率失稳时，能够进行一次调频的机组通过调速系统主动增减机组的功率，以维持频率的新平衡。
3. 故障距离：故障元件与风电场越接近，则受扰后的风电场会有很严重的电压跌落，严重时引发的低压保护也会降低系统频率。
4. 故障情况：故障严重时会导致风电场跳机，影响频率稳定。
5. 风机输出功率波动：当其有功出力突变，若系统调节性能低下，也会改变系统频率。
6. 风机动态性能：可保持低压穿越的机组，在机端电压下跌严重时，仍然能够持续运行一段时间，有机会躲过故障引发的风电场低压。

风机没有并网的时候，系统有功失衡主要因为负荷突变或者和传统机组计划外

停运。然而随着机组并网，系统有功失衡量和失衡速度上升。同时，新能源开发初始阶段，有一系列调度策略如“新能源优先”、“风火打捆”等，更是给常规机组带来不小的调频压力。

目前有定速和变速两种风机。定速风机的转子可以与系统直连，虽然能够给系统贡献一定的惯量，但是转动惯量还比较小，贡献不大。变速风机与系统的连接是利用了换流器，为了提高风机效率，一般处于最大功率追踪状态，但这种情况下的风机不能响应系统频率波动。综上所述，风机的渗透率上升，则电网频率稳定性下降。

2.2.3 光伏频率响应特性及其对电网频率的影响分析

(1) 静态频率特性

功率差值控制可以使光伏电站减载运行，本节将参考常规机组来分析光伏电站的功频静态特性。

1) 常规机组功频特性

发电机组可以提供负荷功率，机组的有功功率随有功负荷产生变化，维持频率在一定范围内偏移。发电机组的功频静态特性系数为式 (2-19)：

$$k_G^* = -\frac{\Delta P_G / P_{GN}}{\Delta f / f_N} = -\frac{\Delta P_G^*}{\Delta f^*} \quad (2-19)$$

式中 ΔP_G ——原动机功率偏移；

P_{GN} ——发电机组的额定有功功率；

Δf ——频率偏移；

f_N ——系统额定频率。

系统功率改变，各机组依据功频静态特性系数来承担不平衡功率，共同纾解系统调频压力，改善系统频率特性。

2) 光伏系统功频特性

预留备用容量可以让光伏进行调频，但牺牲了运行效率。下面分析如何确定备用容量。首先将光伏电站的减载水平定义为 $\sigma\%$ ，公式为式 (2-20)：

$$\sigma\% = \frac{\Delta P'}{P_m} \quad (2-20)$$

式中 $\Delta P'$ ——电站的减载功率；

P_m ——电站最大可发功率。

此时光伏电站可以发出的有功功率为 $(1 - \sigma\%)$ 。光伏电站出力与环境因素强相

关，故考虑光照后进行设定减载水平，如式（2-21）所示：

$$\sigma\% = 20\% \times \frac{S}{1000} \tag{2-21}$$

式中 S ——光照强度。

光照不强时，系统功率随光伏出力的减小而有缺额，此时降低减载水平，补充功率缺额；反之，增加减载水平来缓解频率的升高。基于此，可以根据光照的变化灵活设置电站的减载程度来平抑系统的频率波动。

（2）光伏电站动态频率特性

光伏并网可分为集中式和分布式。分布式应用在低电压等级中，一般不重点研究其对系统的影响。在调频方面，同风机并网特性一样，光伏的不确定性也会加剧常规机组的负担。另外来说，光伏电站运行时受到的约束条件比较严苛，我国对于其在各频率内的运行规定如表 2-1 所示^[63]。由表可见，若含高比例光伏的系统出现高频故障，光伏电站脱网后，系统极易发生频率事故。

表 2-1 光伏电站运行规定

频率范围	运行要求
$< 48\text{Hz}$	由光伏逆变器的允许条件决定
$48\text{Hz} \leq f < 49.5\text{Hz}$	至少能运行 10min
$49.5\text{Hz} \leq f < 50.2\text{Hz}$	连续运行
$50.2\text{Hz} \leq f < 50.5\text{Hz}$	至少能运行 2min,执行调度机构下达的指令，停运的光伏电站不能并网
$> 50.5\text{Hz}$	立即停止送电，停运的光伏电站不能并网

光伏并网需要换流器，该过程中波动不大。但低电压穿越会凸显出光伏电站的有功动态特性；电子元件的特性，如对电源的抗动性或是过负荷性能，都会影响到光伏并网的结果，若这些特性差，可能造成光伏脱网；受光照强度影响，若光伏电站突然投入或退出都会冲击系统，即避免电站的突然投退可以降低对系统功率带来的冲击。以上这些都可能影响光伏接入时的电网运行特性。

2.3 新能源与水电交互影响机理

水电的有功调节性能优良，能够自如应对负荷大范围波动时造成的系统的频率波动。若在同一节点将新能源和水电进行并网，可以将其联合互补发电系统视为虚拟电厂，该电厂中各发电资源可以实现互补发电，就能在相互作用中维持并网点的稳定出力，不仅可以增加发电量，还能改善电网运行条件。

新能源与水电交互发电的可行性有以下几个方面的体现：

(1) 日发电互补。在白天负荷量大的时候，光照充裕下的光伏电站和可观风速下的风电场都可以补充系统出力。与此同时，就可以缩减水电的出力或将部分水能存储起来。晚上，光伏电站随着光照减弱逐渐减少出力，若风速适合，风电场还可继续发电；此时水电便可发挥作用，用白天存下的水能进行出力，以满足晚间负荷需求。凌晨的负荷减少，水电站也随后降低出力，增加库容；此时风电可根据需求选择保持出力或者打包外送，又或者进行储能。

(2) 季节发电互补。我国南方的夏秋季处于水电的丰水期，风、光出力相对较小，此时用水电来弥补光伏和风电的小出力；冬春季水电处于枯水期，但太阳能和风能充足，在水电发电受限的时候，风电和光伏就可以对水电进行补充。图 2-2 所示为我国南方某地某年的风、光、水电的平均出力。从图中来看，这三类电源相辅相成，彼此补充，不仅能提升清洁能源的发电能力，还可以避免一次能源的过度消耗。

(3) 稳定与经济互补。从稳定性角度出发，风、光的不稳定出力加上风电存在的反调峰性质，破坏了系统的有功和频率的平衡，这便要求系统里要有充足的备用容量以对系统受扰动后的波动进行及时补偿。水电因其良好的调节特性，可以有效避免风电和光伏接入电网后所造成的运行风险。从经济性角度出发，风、光、水三者都作为清洁能源，对它们的合理有效利用减少了对一次能源的过度消耗，对环境友好。但因为受风、光能源不稳定的约束，会产生大量弃风弃光现象，能源浪费情况屡见不鲜，从国家战略要求和环境需求方面来看，风、光、水电联合出力会产生良好的社会效益。若能保证风、光优先消纳，加上水电站的储水能力，三者协同发电不仅可以充分利用能源，还能平抑系统受扰后的功率、频率失衡。

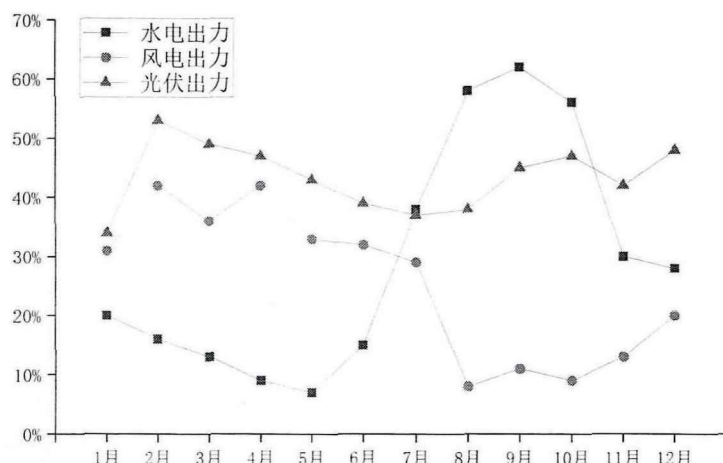


图 2-2 某地风、光、水电站的平均出力曲线

2.4 新能源参与电网调频潜能分析

2.4.1 风电参与频率调节能力分析

风电进行频率调整有两部分能量来源：1) 通过叶片旋转保留的动能；2) 通过超速或者变桨保留的功率。对于第一部分能量来源，在使用该能量时，风机就会偏离原先的最大功率点，有可能发生频率的二次跌落。这种情况下，就好比将大扰动分割成若干个小扰动，系统受到扰动时，虽然能够降低频率的最大偏差，但是系统频率波动的时间也会相应增加；对于第二部分能量来源，风速低的情况下，风机不能像以前一样最大程度地捕获风能，这时频率调节能力受限；风速高的情况下，电力电子设备限制着风机的输出功率，在不毁坏设备的情况下，其输出的电压和电流也因该设备的额定值而受到制约，但总体来说，中高风速的风机调频能力更优于低风速。

风速固定时，DFIG 有功输出可通过风能转换效率系数来改变，该系数值与风机转速和叶片桨距角相关，基于超速法或变桨法的基本调频策略如下：

(1) 超速法

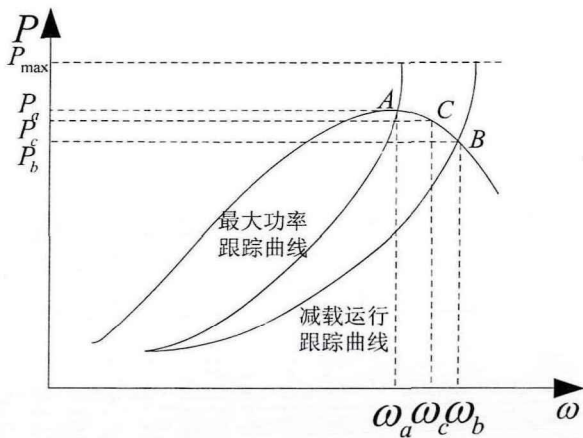


图 2-3 超速控制原理图

通过提高风机转速，使机组偏离最大功率点，降低有功输出，以便保留部分有功。图 2-3 中，A 点处于最大功率跟踪状态，风能转换效率最好，输出功率最大。当机组转速超过 A 点，其有功出力减小，实现了风机的减载运行，从而保留了备用容量。此时若需增加机组出力，可以降低机组转速，如运行于 C 点，重新平衡机组的机械和电磁功率，风机的输出随之变化。

(2) 变桨法

风机捕获的风能与桨距角有关，改变桨距角可以使机组偏离最大功率点，机组便可保留备用。风速固定时，桨距角越大，机组的有功备用也就越大。

如图 2-4 所示，风机初始时刻运行于曲线 1，桨距角增大，曲线整体下移，即从曲线 1 变为曲线 3，此时风机捕获的风能减少，实现了减载运行。这种控制方式可以在全风速下进行控制，调节范围广。但该方法改变的是机组的机械结构，因此响应速度不快，同时如果频繁变动，会磨损机组的机械结构，降低风机的寿命。因此该方法适用于额定风速以上的工况。

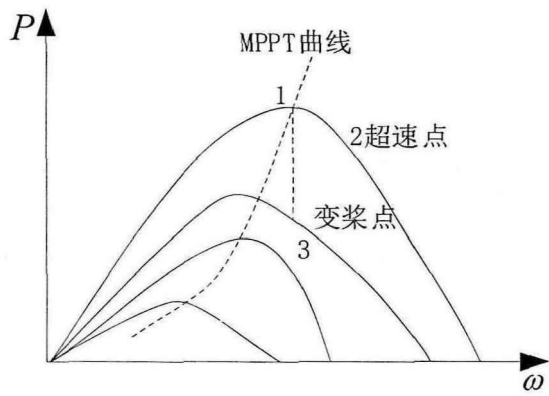


图 2-4 桨距角控制曲线

基于上述分析，两种方法的适用范围和优缺点见表 2-2。

表 2-2 风电减载控制技术比较

控制方法	适用条件	优点	缺点
超速法	中低风速	控制速度快 提供功率备用	调节范围小 发电效益小
变桨法	全风速	适用范围广 调节能力强	机械损耗大 响应速度慢

2.4.2 光伏参与频率调节能力分析

双级式光伏发电结构如图 2-5 所示。图中， C_{b1} 、 C_{b2} 、 L_f 分别是直流滤波电容和输出滤波电感； U_{pv} 、 U_{dc} 分别为阵列侧和逆变器侧的直流电压； R_g 、 L_g 分别为线路电阻和电感； U_i 、 U_g 分别为并网点和电网的电压； P_{load} 是负荷。

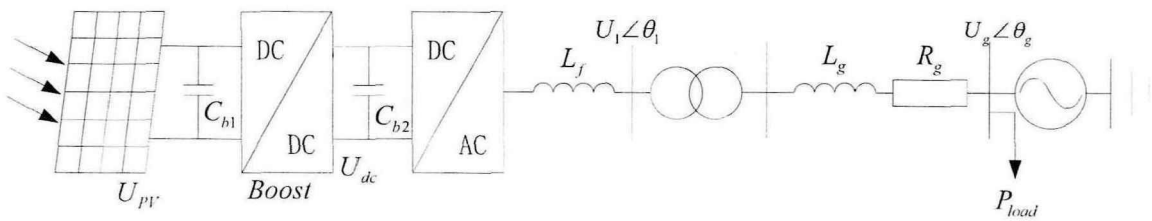


图 2-5 双级式光伏发电系统结构

该系统等效电路模型如下图 2-6 所示：

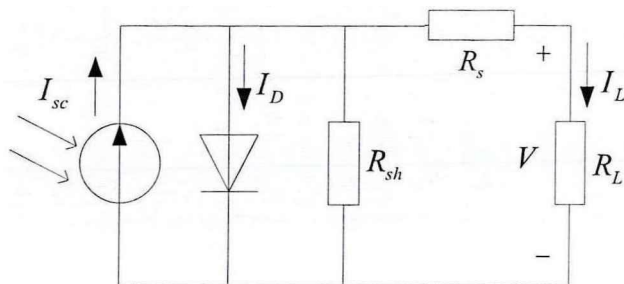


图 2-6 光伏电池等效模型

负载电流 I_L 为式 (2-22):

$$I_L = I_{ph} - I_{d0} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-22)$$

式中 I_{ph} ——由光照引起的电流, 同短路电流 I_{sc} ;

I_{d0} ——饱和电流 (无光照);

q 、 K ——相关物理参数;

V ——电池板端口电压;

A ——常数因子, 正偏电压大时取 1, 小时取 2;

R_s 、 R_{sh} ——串联电阻、旁漏电阻。

以光伏电池外特性参数为基础, 推出与光照强度、温度有关的实际工程用的光伏电池模型为式 (2-23):

$$I_L = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{U}{C_2 U_{oc}}} - 1 \right) \right] \quad (2-23)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{\frac{-U_m}{C_2 U_{oc}}} \quad (2-24)$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right)}{\left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]} \quad (2-25)$$

式中 U_{oc} ——开路电压;

U_m 、 I_m ——最大功率点电压和电流。

光照强度与端口电压可以影响输出功率, 温度与端口电压同样可以影响输出功率, 影响特性如图 2-7、2-8 所示。

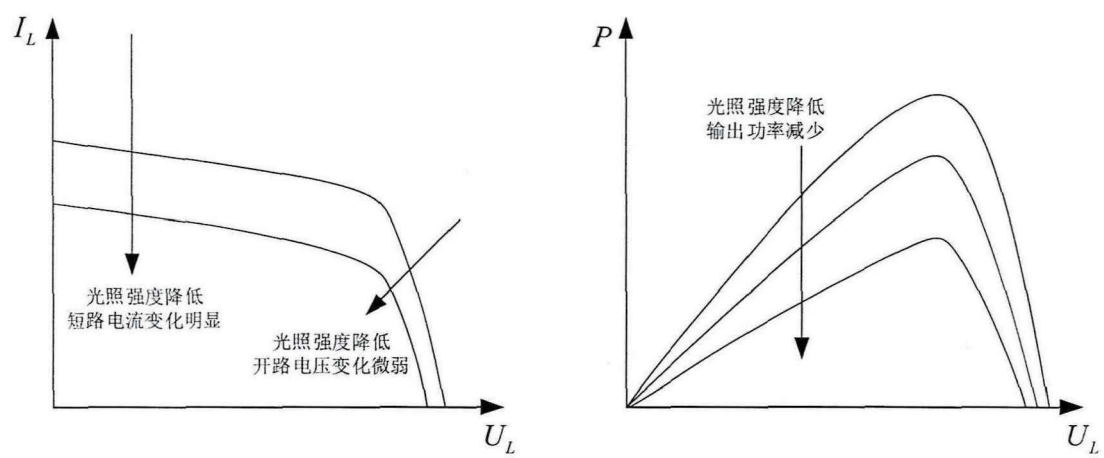


图 2-7 光照强度与端口电压影响

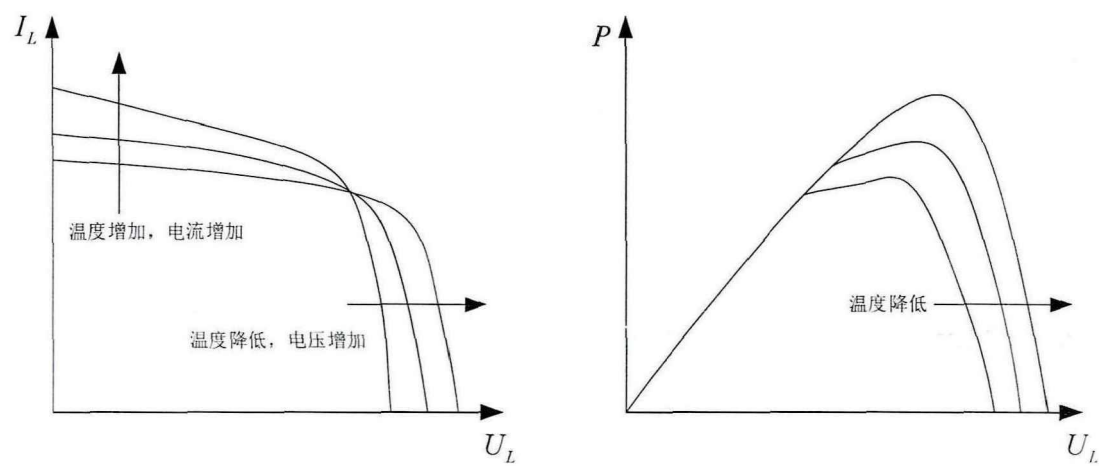


图 2-8 温度与端口电压影响

与风电存在差异，光伏没有旋转叶片，因此就不能利用旋转动能来进行调频。而光伏进行频率调节的能量也有两个主要来源：1）光伏系统的储能环节中的能量；2）通过减载策略预留的功率。

第一种情况，调频能力受储能环节状态的制约，该环节能量大，其调频能力也强，反之调频能力低。在这种控制方式下，频率二次跌落的发生率相对较小。

第二种情况，减载策略单一。由图 2-7、2-8 可以得出，光照强度、温度、端口电压都会影响光伏的输出。但是只有端口电压是可控的。因此，通过控制端口电压，使光伏系统稍偏离最大功率点，进行有功备用的储存，再加上其他技术手段，于系统频率变化时，使光伏参与频率调节。类似于风电，光照强，光伏发电的调频性能强，此时的出力主要取决于逆变器的额定功率；反之，调频能力较弱。

光伏参与调频的方式如下：

(1) 减载运行

光伏电站工作在最大功率 MPPT 模式时，不存在有功备用，不能响应系统频率

变化。此时，若能保证其最大功率跟踪点的电压略小于实际工作电压，就能进行减载运行，并预留出一定的功率备用，以为系统调频的做好充足的准备。减载运行预留有功的示意图如图 2-9 所示。

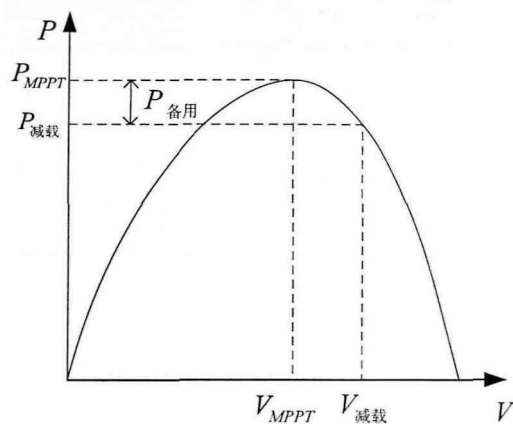


图 2-9 光伏减载预留备用示意图

(2) 虚拟同步发电机技术

这种技术为让光伏发电系统主动参与调频，通过控制接口逆变器让其并网的外特性与常规机组近似，进一步提升新能源在系统中的消纳能力。

虚拟同步发电技术的控制结构图如图 2-10 所示。图中的虚拟同步机控制增添了转动惯量部分，这一部分会在系统频率发生波动时体现出来，而当系统处于稳定状态时，其惯量部分就为零，不产生作用。

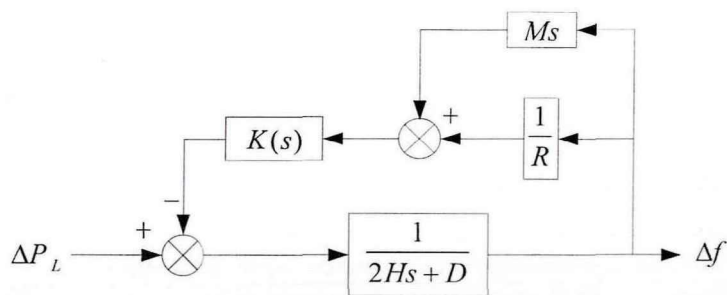


图 2-10 虚拟同步机控制结构图

2.5 本章小结

本章首先通过系统惯性和下垂系数两个参数的变化分析得出新能源大量接入后新系统的惯性和调频能力都有所下降，并基于频率初始变化率、频率最低值、频率稳态值三个频率指标更具体地验证了新系统频率调节能力的变化情况。接着分别基于风电、光伏的有功-频率响应特性分析了新能源渗透率、环境情况等因素对电网频率的冲击。其次，根据水电和新能源发电的不同点，分析了新能源与水电交互影响机理，验证风光水互补发电的可行性和有效性。最后针对现有风电、

光伏参与调频的控制手段表明新能源具有参与电网调频的潜力。

第 3 章 新能源参与电网 AGC 策略

3.1 引言

新能源输出功率随着风、光的波动性和随机性而变得不稳定。此时新能源相当于一个较大的扰动源，通过上一章的分析，新能源并网会给系统的功率、频率稳定带来非常不利的影响，因此新系统的有功功率调度和频率控制也面临着更高的标准和要求。若能寻找新能源机组与水电机组协同参与系统 AGC 的控制策略，使新能源能充分利用自身特性，主动响应 AGC 有功功率指令，便可以对系统的频率波动起到良好的抑制作用。

本章以传统二次调频控制策略为基础，建立了考虑新能源的 AGC 模型。首先，提出了考虑新能源机组和系统功率偏差的 ACE 的计算方法，在此基础上分析了两区域系统中新能源与同步电厂以及各场站内部各机组的调频因子分配方法。最后，在 MATLAB/SIMULINK 仿真环境下搭建包含风光水的两区域系统 AGC 模型，并仿真验证了不同新能源渗透率下其参与系统 AGC 的不同效果，验证了所提策略的可行性。

3.2 传统二次调频控制策略

电力系统调度自动化中非常重要的环节之一就是 AGC，AGC 系统控制框图蕴含了 3 个控制环节，如图 3-1 所示。

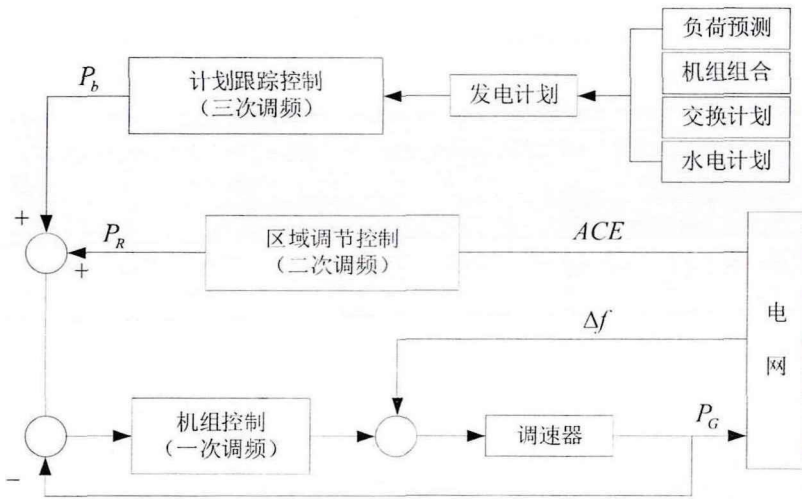


图 3-1 AGC 系统结构示意图

三次调频中的计划跟踪控制，需要响应发电过程中的经济性要求，其中，系统的发电计划由水电计划、交换计划等组成，需求发电量 P 包含了三次调频提供

的发电基准功率 P_b 以及二次调频所输出的调整功率 P_R 。二次调频的区域调节控制，是 AGC 系统的重点，需要计算区域控制偏差（Area Control Error, ACE），然后经功率指令分配环节，给各台发电机组下达目标功率，对区域内的发电机出力进行调控，缩减 ACE 的值。机组控制离不开调速器，其可以在较短的时间内抑制低幅的频率波动。在实际系统中，若干台发电机组的有功输出可以由一台电厂控制器来操控。 P 除去经调速器有差调节后功率偏差，再发送至电厂控制器，下一步给各台机组发送目标出力，这便是整个控制过程。

根据 ACE 控制信号的差异，可以将 AGC 分为 3 种控制模式，分别如下：

(1) 定频率控制模式 FFC:

$$ACE = -10B\Delta f \quad (3-1)$$

式中 B ——频率响应系数；

Δf ——频率偏差。

(2) 定功率控制模式 FTC:

$$ACE = \Delta P_T \quad (3-2)$$

式中 ΔP_T ——联络线上的功率偏差。

(3) 定频率定功率控制模式 TBC:

$$ACE = \Delta P_T - 10B\Delta f \quad (3-3)$$

3.3 新能源参与 AGC 控制策略

3.3.1 考虑机组出力偏差的 ACE 计算方法

新能源输出功率随着风、光的波动性和随机性而变得不稳定。新能源接入电网可以看作给电网中增加了一个不稳定的扰动源，深刻影响着系统频率的稳定。电网的二次调频，更重视机组的最大输出能力，而对机组类型关心不多，因此风、光在二次调频控制中相差无几。

AGC 可以自动地、无差地根据系统需求调节有功功率，但是随着新能源的大量接入，电网 ACE 的计算不仅需要结合传统系统中负荷的波动，更要考虑新能源并网带来的发电功率波动。将每个新能源电源都视作一个机组，对新能源整体进行控制，则 ACE 的计算公式为：

$$ACE = K\Delta f + \Delta P_G + \Delta P_{GW} + \Delta P_T \quad (3-4)$$

式中 ΔP_G ——系统实际功率输出与计划功率输出的偏差；

ΔP_{GW} ——新能源实际功率输出与预测功率输出的偏差。

区别于常规电网的 ACE 计算模型，新系统中考虑新能源的计算模型，除了加入了频率偏差和联络线功率偏差，还结合了新能源机组、常规机组的实际功率输出与预测功率输出的偏差。若新能源出力受扰时，系统输出功率失衡进而导致频率失衡。为恢复频率至额定值，常规机组会做出一些牺牲使其出力不完全符合原有的发电计划，以此平衡系统功率。因此，新能源加入的电力系统中，要求测量新能源并网点的有功出力，计算 ΔP_{GW} ；同理需要测量计算出 ΔP_G ；加上 ΔP_T ，并与 Δf 组成线性组合，得到最终 ACE 信号。之后经过控制器，根据相关要求生成分配系数，由 AGC 给区域调频机组下发调度指令，逐步减小 Δf 并恢复为零。考虑新能源波动的 ACE 计算模型框图如图 3-2 所示。

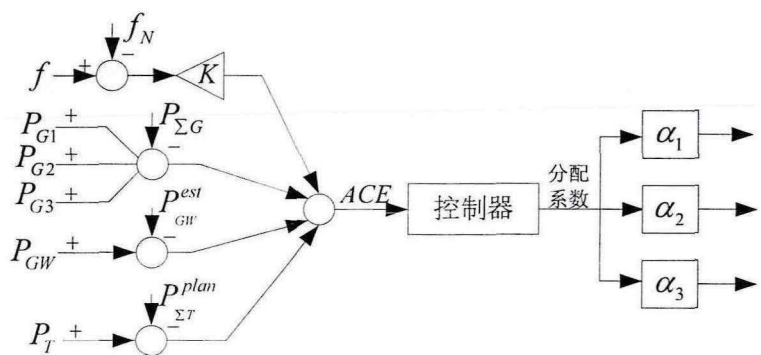


图 3-2 新型系统 ACE 计算模型

3.3.2 新能源与同步电厂调频因子的确定

系统的二次调频通常包含了系统层、电厂层和电机层，通过上节的分析，在计算得到 ACE 之后，便在电厂层进行功率分配。以两区域系统为例，若区域 A 中有传统电厂 1 和新能源电厂 2，则根据指令，各电厂分配到的控制信号为式 (3-5) 所示：

$$\begin{cases} P_{ci} = \alpha_i P_c \\ \sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (3-5)$$

式中 P_{ci} ——区域 A 第 i 个电厂得到的功率控制信号；

α_i ——第 i 个电厂调频分配因子。

基于新能源出力特性，不能单独让其进行 AGC 频率控制，此时便需要充分利用区域内各类机组来进行协同出力，参与 AGC。

为保证新能源得到充分利用，在设计包含新能源的 AGC 协调控制策略时，要使系统功率缺失时首先上调新能源出力，相反地，系统功率盈余时要最后下调其

出力。结合不同机组的动态特性，在进行指令分配时，各机组 α_i 分为三种情况：

- 1) 系统功率盈余，且经受小扰动，但仍可以正常调节，此时只需同步机参与调节，新能源不参与，即 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$ ；
- 2) 系统功率缺额，若新能源保留的旋转备用比 P_{e2} 大，此时先调新能源的出力， $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$ ；
- 3) 系统功率缺额，但新能源备用不足，此时两种类型机组需要同时响应， $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.5$ 。

3.3.3 各场站内部调频因子的确定

经过 3.3.2 节的过程，在各场站内部还需要根据 P_{ci} 生成二次调频信号 P_{eri} ，如式 (3-6)：

$$P_{eri} = K_p^{er}(P_{ci} + k\Delta f - \sum_{j=1}^m \Delta P_{Tj}) + K_i^{er} \int (P_{ci} + k\Delta f - \sum_{j=1}^m \Delta P_{Tj}) dt \quad (3-6)$$

式中 k ——频率调节系数；

m ——电厂 i 内的 m 台机组；

ΔP_{Tj} ——电厂 i 内第 j 台机组需要的功率变化量。

在求出电厂 1 的调频信号 P_{er1} 后，还要在不同机组间进行分配控制信号，其控制信号计算表达式为 (3-7)：

$$\Delta P_{1j} = \beta_{1j} P_{er1} \quad (3-7)$$

式中 ΔP_{1j} ——电厂 1 第 j 台机组的二次调频控制信号；

β_{1j} ——第 j 台机组在电厂 1 中的调频参与因子。

同样地，新能源电场内不同机组会工作在不同的工况下，则新能源电场的二次调频信号的确定相对复杂。

各新能源机组的功率分配同输出功率相关，但不是每台新能源机组都可以参与辅助调频，所以一定要评估机组的运行状态之后才能确定该机组是否合格。现设计一种新能源电场内调频因子确定方法，若新能源电场 2 内有 m 台机组，新能源机组参与调频的门槛值为 P_{2set} ，则机组净出力 P'_{wj} 为式 (3-8)：

$$P'_{wj} = \begin{cases} P_{wj} - P_{2set}, & P_{wj} > P_{2set} \\ 0, & P_{wj} < P_{2set} \end{cases} \quad (3-8)$$

若新能源机组参与二次调频，必须要使其出力高于 P_{2set} ，否则不能响应系统发

出的 AGC 指令参与调频。综上，响应 AGC 指令的各个机组的调频参与因子 β_{2j} 计算表达式为 (3-9)：

$$\begin{cases} \beta_{2j} = \frac{P'_{wj}}{\sum_{j=1}^m P'_{wj}} \\ \sum_{j=1}^m \beta_{2j} = 1 \end{cases} \tag{3-9}$$

则各个机组收到的功率指令信号 ΔP_{2j} 为式 (3-10)：

$$\Delta P_{2j} = \beta_{2j} P_{er2} \tag{3-10}$$

所以系统内二次调频的总功率 ΔP_{all} 为式 (3-11)：

$$\Delta P_{all} = \Delta P_G + \Delta P_w \tag{3-11}$$

式中 ΔP_G 、 ΔP_w ——参与二次调频的同步机、新能源机组总功率。

根据上述分析，区域 AGC 的控制原理如图 3-3 所示。

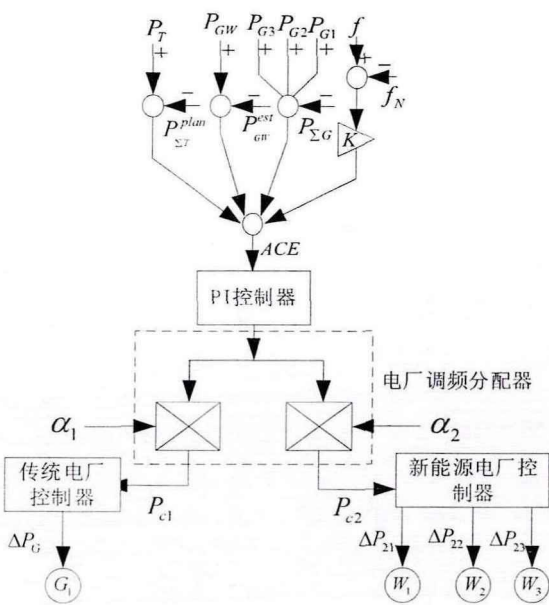


图 3-3 两区域系统 AGC 综合控制策略

3.3.4 两区域系统多源 AGC 协同控制模型

含多种类型电源的两区域系统 AGC 协同控制模型如图 3-3 所示，AGC 控制环节有控制器和功率分配两部分。其中，通常 PI 控制器的输入为系统实时更新的 ACE 信号，再将总调节功率 ΔP 作为输出；采用相关算法在各电厂间分配 ΔP ，进

一步在各 AGC 机组间分配二次调频指令。这种控制方法不再被动地弃风弃光，而是充分利用了新能源的调频潜力，使其主动参与系统 AGC 任务。将新能源纳入到 AGC 一般可以分为三个层次：

- 1) 新能源可被视为“负”的负荷，需要与系统中的其他 AGC 机组进行综合调控；
- 2) 预测新能源出力，考虑负荷波动，以此安排发电计划；
- 3) 改进新能源机组使其参与系统有功控制，主动支持系统的功率、频率波动，使新能源被纳入 AGC 控制环节中。

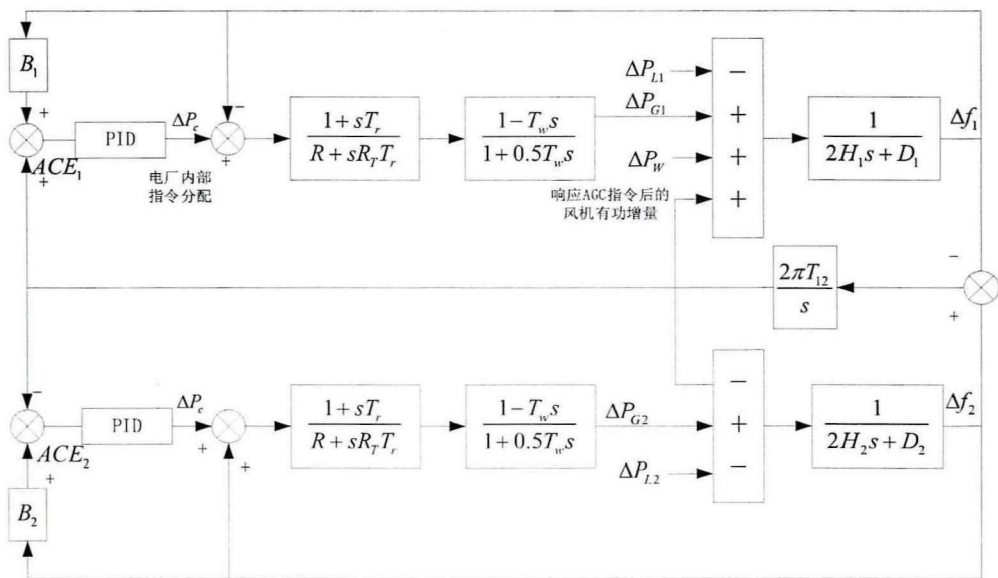


图 3-4 新能源协同传统机组参与 AGC 的控制模型

当系统受到扰动，各机组一次调频调速器先动作，将频率维持在一定范围；其次，AGC 控制系统采集 ACE 信号，根据各 AGC 机组的运行状态，下发功率响应信号；最后，各机组根据指令响应系统的频率偏差，实现无差调节。

3.4 算例分析

3.4.1 AGC 调频模型

(1) 调频模型图

基于 MATLAB/SIMULINK 搭建两区域框架下的 AGC 协同控制图，如图 3-5 所示。其中，区域 A 内部框图如图 3-6 所示，图中，1 号区域为 PI 控制器，2 号区域为 AGC 功率指令分配模块。2 号区域内部模型如图 3-7 所示，共搭建了水电、风电、光伏三种类型的发电机组。

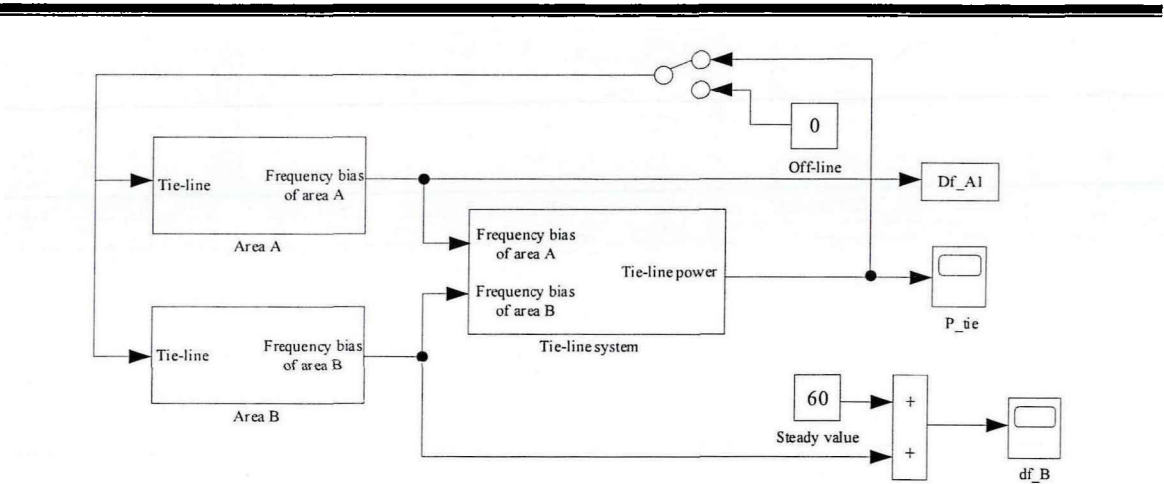


图 3-5 两区域 AGC 协同控制图

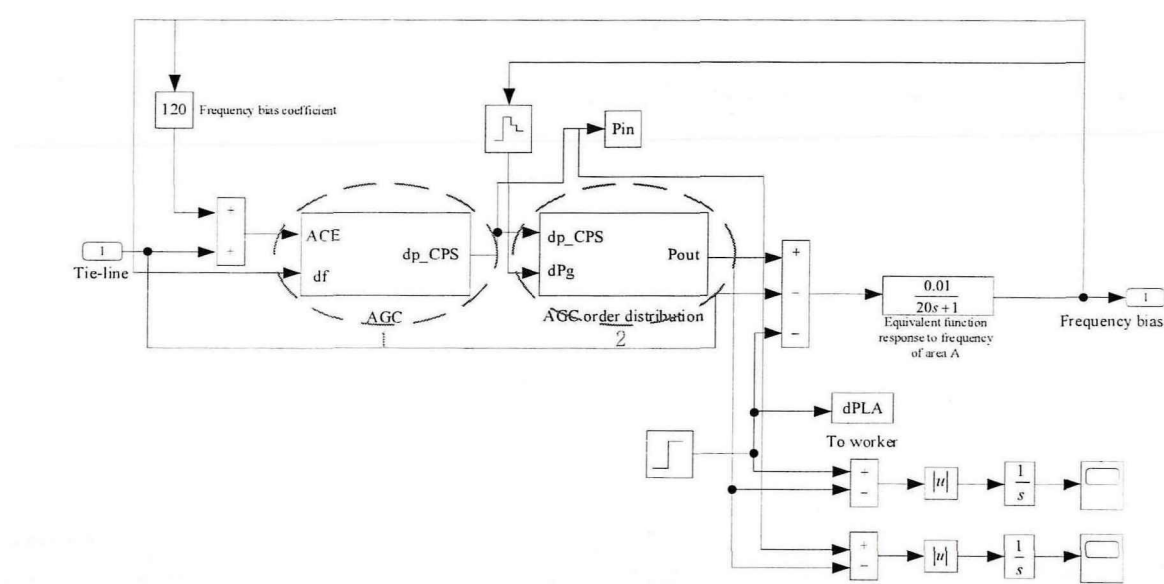


图 3-6 区域 A 内部调频框图

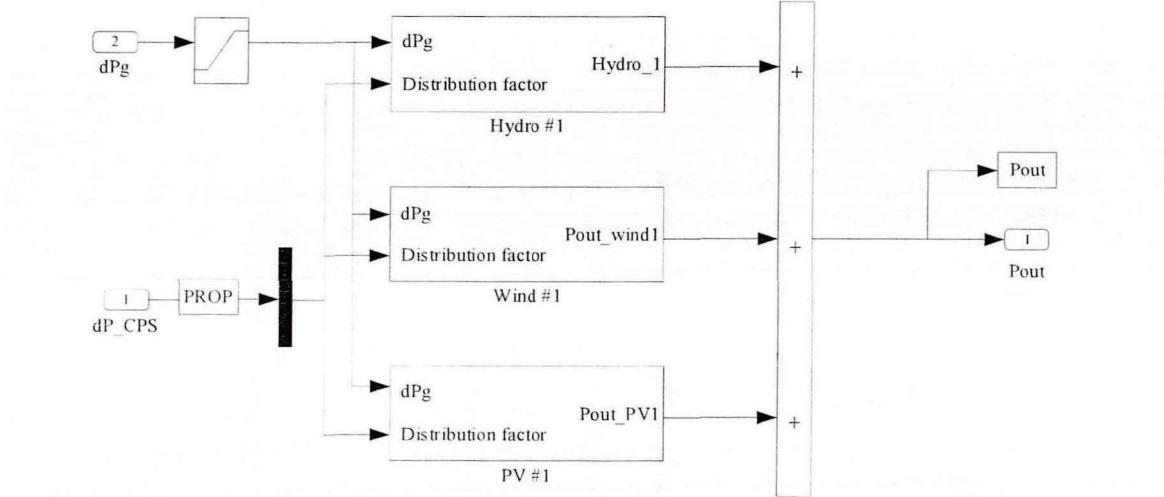


图 3-7 2 号区域内部模块

(2) 调频上下限设置

各调频机组调频上下限参数如表 3-1 所示。

表 3-1 调频上下限参数设置

调频机组类别	调频下限 (MW)	调频上限 (MW)
水电调频	-10	20
风电调频	-5	15
光伏调频	-10	10

3.4.2 新能源协同参与 AGC 仿真验证

为了验证 AGC 模型及风电、光伏协同水电参与 AGC 策略的有效性，本节对比分析以下几种工况下电网的动态特性，即：

- (1) 仅五台水电机组参与二次调频，新能源机组不参与调频；
- (2) 令新能源机组辅助水电机组参与电网二次调频，水电机组和新能源机组总数为 5 台，逐步增加参与二次调频的新能源机组的台数，分别验证水+风、水+光不同组合的二次调频情况。

根据仿真结果中功率扰动和实际输出功率之间的面积大小来判断调频效果优劣。

Case1：5 台水电机组参与 AGC：

图 3-8 为 5 台水电机组进行 AGC，而风电和光伏机组都不参与调频。

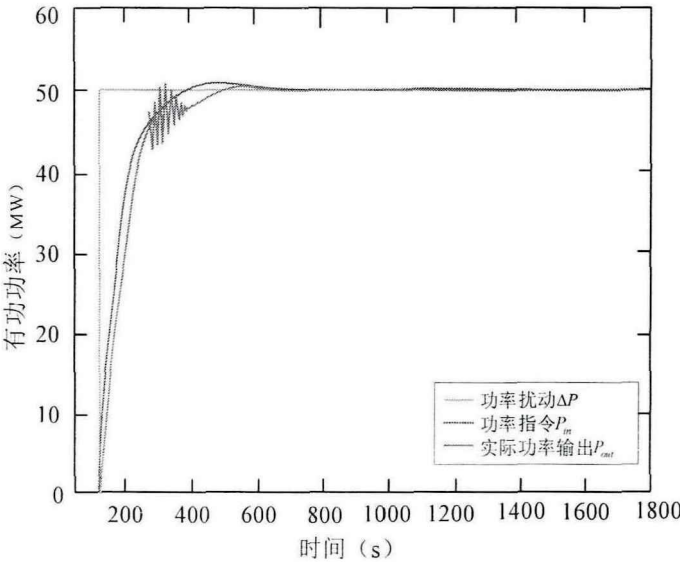


图 3-8 五台水电机组调频情况

Case2：水电+风电参与 AGC，水电机组逐一替换成风电机组：

图 3-9、图 3-10 分别展示了 3 台水电机+2 台风电机组组合和 2 台水电机+3 台风电机组组合的调频情况。

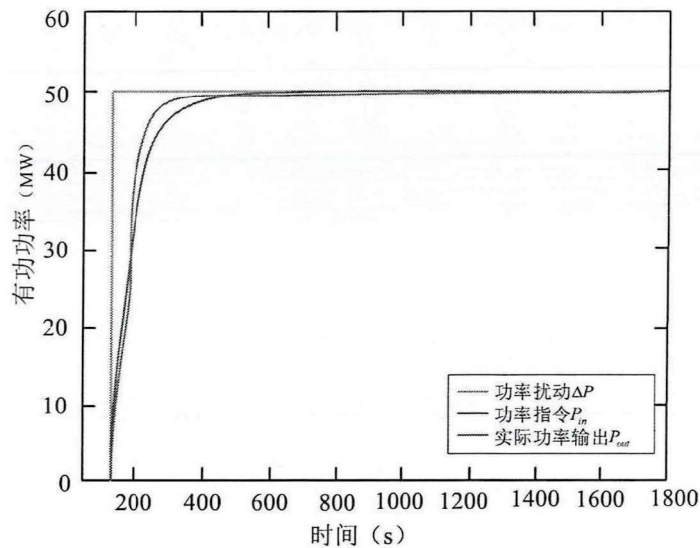


图 3-9 3 水+2 风调频情况

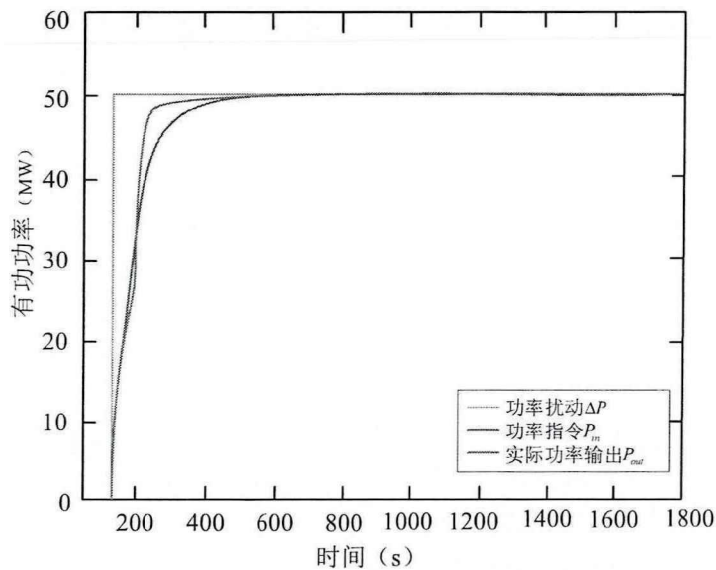


图 3-10 2 水+3 风调频情况

Case3: 水电+光伏参与 AGC，水电机组逐一替换成光伏机组：

图 3-11、图 3-12 分别展示了 3 台水电机+2 台光伏机组组合和 2 台水电机+3 台光伏机组组合的调频情况。

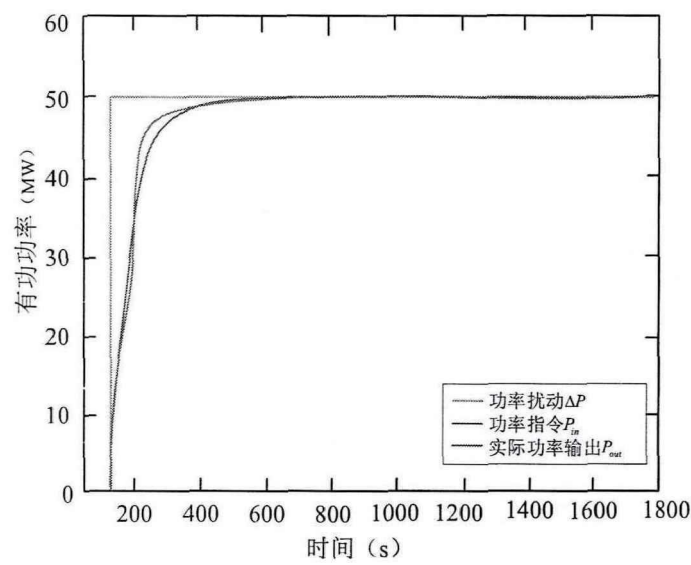


图 3-11 3 水+2 光调频情况

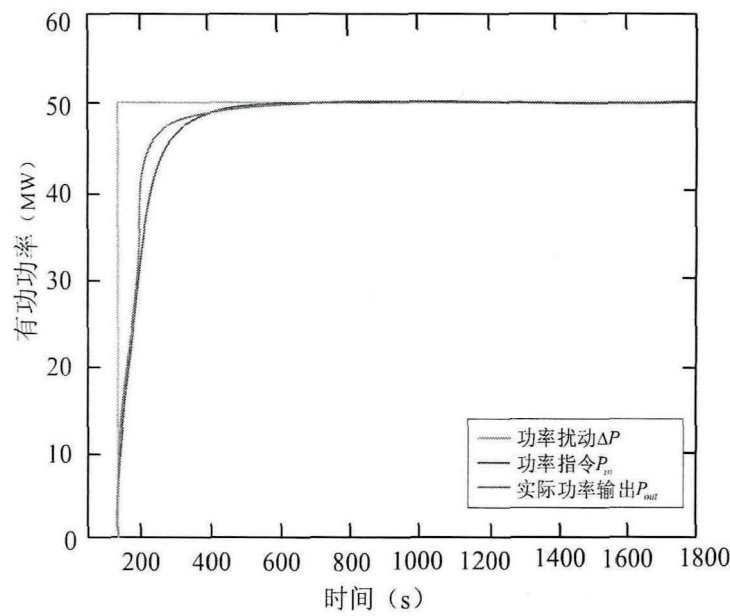


图 3-12 2 水+3 光调频情况

为了更清晰地体现五种不同的水电机组和新能源机组配合情况的调频效果，计算 ΔP 和 P_{out} 之间的面积大小来表征调频情况，计算结果如表 3-2 所示，结合图 3-8~图 3-12，可以得出以下结论：

表 3-2 水电机组和新能源机组配合调频情况

机组类型	水电 5	水电 3+新能源 2	水电 2+新能源 3
水电	4126	—	—
水+风	4126	4017	3818
水+光	4126	3920	3819

(1) 由图 3-8, 功率扰动和实际功率输出之间的面积为 4126, 水电机组的调频能力还可以, 而实际输出功率 P_{out} 出现了功率波动, 这是由于系统频率变化的过程中有一次调频的作用, 而水电机组的水锤效应使得其产生了功率反向调整的效果, 该效应对其一次调频效果影响严重, 但从整体来看, 虽然过程中的调频能力有所下降, 但水电机组的 AGC 效果仍然是比较好的;

(2) 将新能源逐步纳入 AGC 调频系统后, 随着水电机组的数量减小, 受水锤效应的影响减小, 所以振荡逐渐减小, 一定程度上抑制了水电机组在一次调频过程中的水锤效应, 曲线趋于光滑;

(3) 新能源协同水电机组进行二次调频时, ΔP 和 P_{out} 之间的面积都有所缩减, 水电+风电组合中, 面积由原来的 4126 减至 4017, 再到 3818, 逐渐平稳; 水电+光伏组合中, 面积减至 3920, 再到 3819, 也趋于平稳。随新能源机组数增加, 曲线逐渐平稳, 调频效果逐渐改善。这说明新能源可以在一定程度上替代传统机组参与系统调频, 减轻原有系统二次调频的压力, 提升整体的调频效果。

3.5 本章小结

本章研究了风、光新能源参与系统 AGC 的策略, 分析了考虑各机组出力偏差、系统频率偏差、联络线功率偏差的 ACE 计算方法, 确定了区域内新能源电场与同步电场之间以及各场站内部各机组调频因子的分配方法, 重点说明了新能源电场内由于不同机组运行于不同工况下, 引入调频的门槛值来选取合适的新能源 AGC 机组。搭建了包含风光水的两区域系统 AGC 模型, 分别模拟纯水电机组、水电机组+风电机组、水电机组+光伏机组不同的组合下的调频情况, 经过理论和仿真分析得出如下结论:

(1) 水电机组的水锤效应会影响到系统的频率调节, 使得在调节过程中存在一定的振荡, 但随着新能源渗透率的增加, 水电机组比例减小, 可以在一定程度上抑制水锤效应带来的不利影响;

(2) 随着新能源参与 AGC, 调频效果得到了改善, 说明新能源可以在一定程度上取代传统机组, 缓解原有系统二次调频的压力, 改善整体的调频效果。

第 4 章 风光水机组参与 AGC 协同优化策略

4.1 引言

为了保证及时性和抗干扰性，二次调频一般来说被设计成无优化的环节，机组调节功率往往采用最基本的等比例分配，但这种考虑通常使得发电机组不能工作在经济点。为了机组运行地更加经济、安全和高效，现对风光水机组 AGC 的参与因子进行合理优化是非常必要的。本章采用调频速度、水电机组穿越振动区次数、调频成本三个目标函数，结合各机组运行的约束条件，采用多目标粒子群算法，对机组参与 AGC 的调频指令进行优化，并在 IEEE 标准两区域模型的基础上，加入了新能源机组，验证所提优化策略的有效性。

4.2 风光水机组协调优化模型

4.2.1 目标函数

在进行优化时，需要考虑到负荷预测误差，利用正态分布系数作为各误差在优化目标中所占权重。

为了能够更加合理地响应系统频率波动，对系统中的不平衡功率进行分配，本节选取 3 个目标函数进行模型优化，具体如下：

(1) 调频速度最快

调频速度目标函数为式 (4-1)：

$$\max F_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_w} v_{w,i} \lambda_{w,i} \Delta P_{Lx} + \sum_{i=1}^{N_p} v_{p,i} \lambda_{p,i} \Delta P_{Lx} + \sum_{i=1}^{N_H} v_{H,i} \lambda_{H,i} \Delta P_{Lx}}{\sum_{i=1}^{N_w} \lambda_{w,i} \Delta P_{Lx} + \sum_{i=1}^{N_p} \lambda_{p,i} \Delta P_{Lx} + \sum_{i=1}^{N_H} \lambda_{H,i} \Delta P_{Lx}} \quad (4-1)$$

式中 $v_{w,i}$ 、 $v_{p,i}$ 、 $v_{H,i}$ ——第 i 台风、光、水电机组的平均调节速度。

(2) 水电穿过振动区次数最少

在某些区间内，水电机组出力振动，因此应尽可能躲避掉振动区，否则将会对系统的稳定带来消极作用，其目标函数为式 (4-2)：

$$\min F_2 = \sum_{x=1}^{10} \left[\frac{1}{5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x}{50}} \sum_k^H N_k (\lambda_k \Delta P_{Lx}) \right] \quad (4-2)$$

式中 N_k ——若机组 k 进入振动区， $N_k = 1$ ，否则为 $N_k = 0$ ；

λ ——机组二次调频分配因子；
 x ——预测误差百分比；
 ΔP_{Lx} ——误差为 $x\%$ 时的有功功率；
 H ——参与 AGC 水电机组数量。

(3) 经济性最优

为了提升新能源利用率，最大程度使用新能源的预留备用，在此目标函数中引入弃风、弃光惩罚因子。其中弃风、弃光量表示为新能源预留备用减去参与 AGC 所输出的功率。经济性目标函数表达式为式 (4-3)：

$$\min F_3 = \sum_{x=1}^{10} \left[\frac{1}{5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x}{50}} \left(\sum_i^N C_i (\lambda_i \Delta P_{Lx}) + \sum_j^M C_j (P_{jR} - \lambda_j \Delta P_{Lx}) \right) \right] \quad (4-3)$$

式中 C_i ——水电机组参与调频的成本；

C_j ——弃风、弃光惩罚成本；

P_{jR} ——新能源预留备用，一般取 0.1 倍预测值；

N 、 M ——参与 AGC 的水电机组以及新能源机组数量。

1) 水电机组调频成本

当下调水电出力时，有可能发生弃水现象，相反地，上调水电出力时一般不需要考虑其调频成本。

2) 新能源调频成本

该成本主要来源于弃风、弃光，这是源于在其主动减载后的不合理调频安排^[64]，主要表示为新能源减载功率减去参与调频的功率。

4.2.2 约束条件

(1) 系统功率平衡约束：

$$\Delta P_L = \sum_k^H \lambda_{kh} \Delta P_L + \sum_j^N \lambda_j \Delta P_L + K_s \Delta f \quad (4-4)$$

式中 K_s ——频率偏差系数。

(2) 水电机组出力约束：

$$P_{kH\min} < P_{kH} < P_{kH\max} \quad (4-5)$$

式中 $P_{iH\min}$ 、 $P_{iH\max}$ ——不停机的水电机组 k 最小与最大输出功率。

(3) 新能源出力约束：

$$0 < P_j < P_{j\max} \quad (4-6)$$

式中 $P_{j\max}$ ——新能源出力。

(4) 水电机组爬坡速率约束：

$$D_{KH} < P_{KH}(t+1) - P_{KH}(t) < U_{KH} \quad (4-7)$$

式中 D_{KH} 、 U_{KH} ——水电机组 k 向下、向上的爬坡速度的最值。

(5) 水电机组振动区约束：

如图 4-1 所示，机组正常运行在 $[a, d]$ 内， $[a, d]$ 内的 $[b, c]$ 为振动区。此时振动区约束为：

$$a < P_{KH} < b \text{ 或 } c < P_{KH} < d \quad (4-8)$$



图 4-1 水电机组振动区示意图

4.3 多目标优化问题求解算法

对于多目标优化 (Multiple Objectives Programming, MOP) 问题，其通常用以下方法进行解决：(1) 引入权重，将多目标分解为单目标问题；(2) 采用智能优化算法。其中，第二种处理方法具有强自适应性和组织能力，可以用来解决大型复杂问题，应用广泛。

单目标问题的最优解一般只有一个，但对于 MOP 问题，每个目标函数互相影响，一般不能同时取得最优解，往往需要牺牲某个目标的性能去达到整体相对最优。所以对于 MOP 问题，引入非劣解的集合——Pareto 解^[65,66]。

4.3.1 基于 Pareto 最优解的多目标优化概述

MOP 求解需要通过某种算法，计算 Pareto 前沿面的折衷解集，以此作为非支配解。假设 a 和 b 都是两个目标函数 F_1 与 F_2 的 Pareto 解，它们存在以下几种关系：

(1) a 优于 b ：带入 a 所求出的 F_1 与 F_2 的函数值都优于 b 对应的函数值^[67]。

以图 4-2 为例，其中， e 对应的 F_1 与 F_2 的值均小于 c 、 d 的值，便可称 e 优于 c 和 d 。

(2) a 无差别于 b ：若对 F_1 ， a 优于 b ，但对于 F_2 ， b 优于 a ，此时就是 a 无差别于 b 。图 4-2 中， c 与 d 为无差别解。

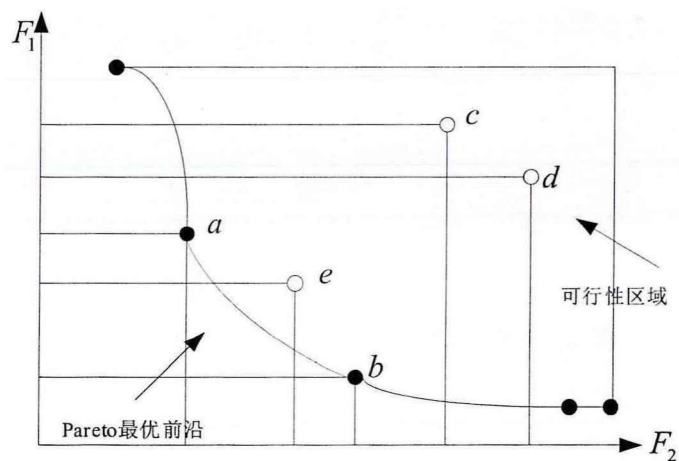


图 4-2 Pareto 解的关系

(3) Pareto 最优解：对于 F_1 与 F_2 ，空间中永远不存在其他优于 a 的解，则称 a 为 Pareto 最优解。如图 4-3 所示， x_1 为是 F_1 求出的最小解，则 x_1 为 F_1 的 Pareto 最优解，同理， x_2 为 F_2 的 Pareto 最优解。实际问题中，解在 $[x_1, x_2]$ 范围内的都属于 Pareto 最优解。因此一般来说，具体的多目标问题存在多个 Pareto 最优解，这时就需要结合实际情况进行决策。

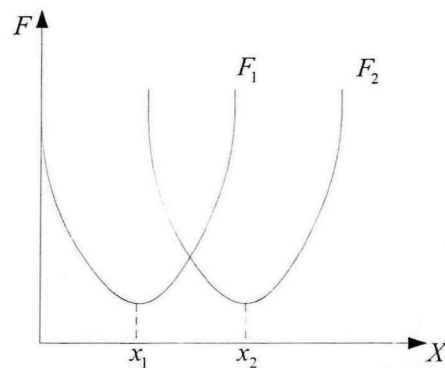


图 4-3 Pareto 最优解示意图

(4) Pareto 最优前沿

如图 4-2 所示，Pareto 最优解集中包含所有 Pareto 最优解，这些解通过目标函数的映射组成了 Pareto 最优前沿。即 Pareto 最优解和其对应目标函数值一起组成 Pareto 最优前沿。

4.3.2 多目标粒子群算法概述

本文运用多目标粒子群算法 (multi objective particle swarm optimization algorithm, MOPSO) 求解前述优化模型，MOPSO 在求解时，粒子位置是问题的解，其移动方向和距离由速度决定，带入模型可求出适应函数值。当搜索指标为若干个时，有时候解集之间不能互相支配。此时将非劣解归入同一集合，即外部档案

集，在该集合内可以求取全局最优。

MOPSO 算法的步骤如下：

- (1) 参数赋值，初始群体为 P_1 ，该群体的非劣解放入 Archive 集中得到 A_1 ， t 为当前进化代。
- (2) 设粒子 j 正在进化，产生下一代：
 - 1) 计算粒子密度：用网格划分目标空间，每个小空间中的粒子含量即为粒子密度；
 - 2) 在 A_t 中选择最优粒子 $g_{j,t}$ ，其质量可以影响 MOPSO 算法收敛性能的好坏，若群体粒子弱于 Archive 中的粒子数越多，代表搜索潜力越强，反之越弱；
 - 3) 更新粒子参数，在 g_{best} 和 P_{best} 的引导下搜寻最优解。
- (3) 更新 Archive 集，保存 P_{t+1} 中的非劣解。
- (4) 截断 Archive 集：维持 Archive 集规模稳定，删除多余粒子。
- (5) 输出 Archive 集中的粒子。

利用 MOPSO 对本文提出的优化模型进行求解，求解的步骤如图 4-4 所示：

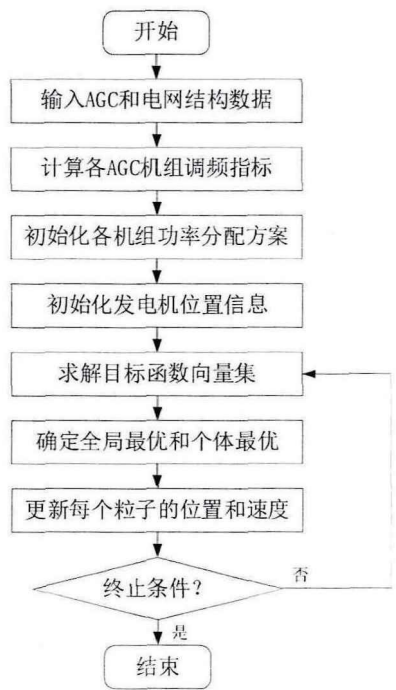


图 4-4 模型求解流程图

在使用 MOPSO 求解出前述多目标函数的 Pareto 前沿面之后，用模糊逻辑求解折中解。第 j 个解、第 m 个目标函数的隶属度函数如式 (4-9)：

$$u_{jm} = \frac{F_{j\max} - F_j}{F_{j\max} - F_{j\min}} \tag{4-9}$$

式中 $F_{j\max}$ 、 $F_{j\min}$ ——第 m 个目标函数的最大最小值。

归一化后的隶属度函数为式 (4-10)：

$$u_j = \frac{\sum_m^M u_{jm}}{\sum_j^J \sum_m^M u_{jm}}$$

(4-10)

式中 J, M ——非支配解和目标函数集。

式 (4-10) 所求出的最小解即为最优解。

4.4 算例分析

4.4.1 AGC 模型基本资料

本节以 IEEE 中标准的两区域模型为基础，并在此基础上进行改进，设计新的研究模型，即改变原模型中区域 A 中单独的等效机组，将其扩展至 3 台 AGC 机组，分别为水电机组、风电机组、光伏机组。图 4-5 是 AGC 机组动态响应的频域模型，机组传递函数见表 4-1，其各个参数见表 4-2；表 4-3 描述了 AGC 机组主要的功率调节参数；表 4-4 给出了机组的单位调频成本和平均调频速度。

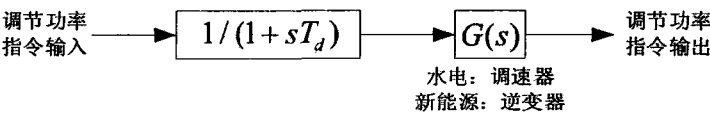


图 4-5 不同 AGC 机组的动态响应模型

表 4-1 AGC 机组动态响应的 G(s)传递函数

类型	传递函数
水电机组	$\frac{(1-T_1s)(1+T_2s)}{(1+0.5T_1s)(1+T_3s)}$
新能源机组	$\frac{1}{1+T_4s}$

表 4-2 AGC 机组 G(s)参数

机组	类型	传递函数参数
G_1	水电机组	$T_1=1, T_2=5, T_3=0.513$
G_2	风电场	$T_4=0.01$
G_3	光伏电站	$T_4=0.01$

表 4-3 AGC 机组功率调节主要参数

机组	T_d / s	$\Delta P^{rate} / (MW / \min)$	$\Delta P^{max} / MW$	$\Delta P^{min} / MW$
G_1	5	150	20	-10
G_2	1	—	15	-5
G_3	1	—	10	-10

表 4-4 各机组单位调频成本和调频速度

机组	单位调频成本/ (MW/元)	平均调频速度/ (MW/min)
G_1	10.62	28.63
G_2	12.66	1.92
G_3	12.66	2.25

4.4.2 算例设置及求解

为了验证模型的有效性，本文设置以下两个算例进行了对比分析：

Case1：当电网发生 300MW 的功率扰动，各机组按照传统等比例原则进行功率指令的分配；

Case2：当电网发生 300MW 的功率扰动，各机组按照本文所设计的模型进行功率指令的分配。

两种情形下，针对不同的策略，其调频参数的决策结果见表 4-5、表 4-6。

表 4-5 不同场景下功率分配方案

场景	ΔP_1^{in}	ΔP_2^{in}	ΔP_3^{in}
Case1	128	96	76
Case2	142	103	55

表 4-6 不同场景调频参数对比

场景	调频速度 (MW/min)	水电机组穿越 振荡区情况 (次)	调频成本(元)	频率偏差 (Hz)
Case1	13.70	5	3536.88	0.312
Case2	15.83	4	3505.32	0.263

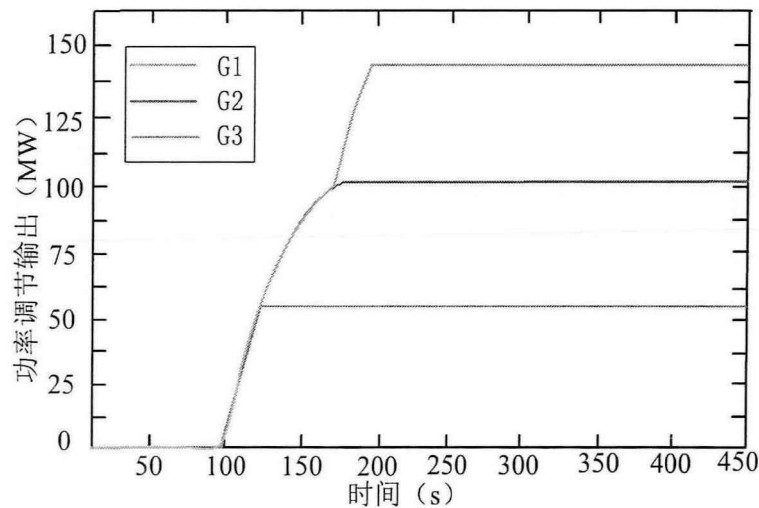
在决策中，功率指令进行分配时水电占比更有优势，这是因为相对而言，其

更经济，单位调频成本低，加上调节速度快，而且水电机组具有良好的调频能力。

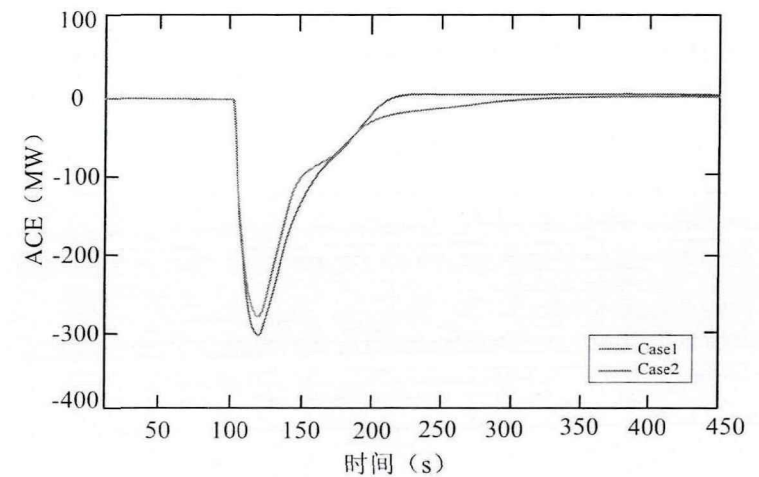
4.4.3 基于 MOPSO 的优化结果分析

从表 4-6 可以看出，若采用本文提出的优化策略，能充分发挥新能源的潜力进行频率调节，不仅可以有效降低调频成本，同时还能改善水电机组在振荡区的情况。因此，可以得出若将新能源参与 AGC 纳入原有 AGC 体系，则水电机组的调频压力大大缓解，同时还能改善水电机组的调频性能。

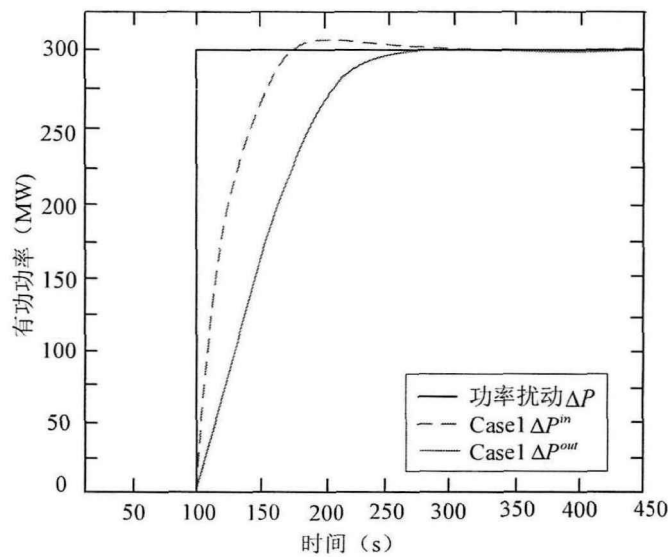
两种场景下系统优化结果的仿真结果如图 4-6 所示。



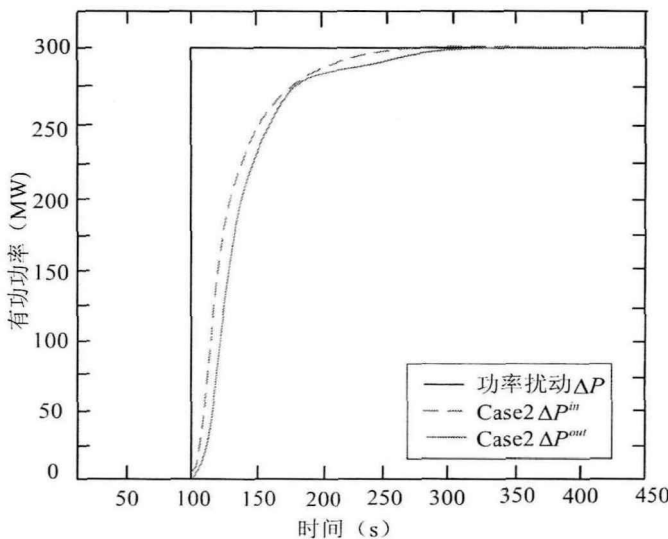
a) 基于 MOPSO 机组的功率输出情况



b) ACE 曲线



c) Case1 总功率调节曲线



d) Case2 总功率调节曲线

图 4-6 Case1 和 Case2 优化结果对比 ($\Delta P_L = 300MW$)

从上图中可分析得出：

(1) 新能源参与系统 AGC 后，能够有效合理地平抑系统频率的变化，而利用本文设计的策略时，系统频率改善情况更好。在 Case1 中，频率偏差约为 0.312Hz，而 Case2 中利用本文的策略其系统偏差为 0.263Hz。因此本文设计的策略，大大改善了新能源协同水电机组的调频效果。

(2) 利用 MOPSO 算法进行策略的优化，机组的出力随指令发生变化，减小了功率偏差，同时 ACE 的变化幅度更小，而总功率调节曲线随之改变，但实际上的输出曲线与指令曲线更加贴合；

(3) 因为新能源机组的响应速度比较快，功率刚开始发生变化时，可以主动担负起更多的功率扰动，这便加速了功率平衡的恢复。

若能合理利用新能源，则系统受扰后能够更加快速有效地恢复初始频率。本文所设计的优化策略，在最大程度上加大新能源的调频收益。将新能源纳入水电机组 AGC 系统，在自然资源充足的时候，新能源更能发挥其调节能力。

4.5 本章小结

本章提出风光水机组 AGC 协调优化模型，基于 Pareto 理论通过多目标粒子群算法求解三个目标函数，优化了各个机组的功率分配系数，并在仿真中验证了模型和策略的有效性，得出以下结论：

（1）新能源参与系统频率调节后，可以有效改善系统的频率失稳情况，帮助系统频率快速恢复稳定；（2）与传统的等比例分配方法相比，本文所设计的策略，具有更优良的调节效果，各目标函数值更优。

通过所提策略，可以在一定程度上充分发挥新能源的优势，减轻系统受扰时遭受的冲击，尽最大可能维持系统的频率稳定。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

随着电网技术的蓬勃发展，如今的大电网已是规模庞大、结构复杂、形式多样的交直流混联电网，加上资源的枯竭与环境的恶化，以风电、光伏为首的新能源发电技术逐渐成为未来电网发展的重头戏。而因为自然资源的不稳定，新能源发电出力随之波动。大量的新能源并网，改变了传统机组的发展格局，同时削弱了系统的频率恢复能力。因此，拓展新能源调频的新理论和新技术，将其纳入现有的电网调频手段中，是改善电网频率和提升电能质量的重要环节。为此，本文的成果及创新点如下：

（1）阐述了高比例新能源给电网频率特性带来的负面影响，包括系统惯性和下垂系数的改变，以频率初始变化率、频率最低值和频率稳态值为指标，具体验算了并入新能源的新系统的频率调节能力；从风、光新能源的调节特性和新能源与水电交互特性等角度，研究表明了新能源进行频率调整的必要性和可行性。

（2）基于传统二次调频控制模式，提出考虑不同渗透率下新能源参与 AGC 的方法。该方法在计算 ACE 时加入了新能源的发电功率波动，也考虑了系统实际与预测的功率偏差；提出考虑新能源机组参与 AGC 时的门槛功率的调频因子分配方法。仿真结果表明，新能源参与系统 AGC，可以改善系统的频率特性，且随着新能源渗透率的增加，水电机组比例减小，可以在一定程度上抑制水锤效应在调节过程中带来的不利影响，减轻系统二次调频的压力，改善整体的调频效果。

（3）针对含有新能源电网系统的 AGC 环节展开协调优化，提出考虑系统调频速度、水电机组穿越振动区次数、调频成本三个目标函数的优化模型，并结合 Pareto 通过 MOPSO 进行求解决策，寻找最优的机组功率分配系数。仿真对比了传统等比例控制策略和本文所提出的优化策略，仿真结果表征，与传统的方法相比，本文所设计的方法，可以更好地协调各目标、ACE 变化幅度缩小、调频性能更佳。通过所提策略，充分利用了新能源机组的优势，发挥其调节作用，减轻系统冲击，最大程度的保障了系统的频率稳定。

5.2 展望

由于个人研究水平有限，本文仍存在许多不足之处，需要进一步改进和完善：

（1）本文以云南电网高比例新能源、高比例电力电子系统为背景展开研究，但实际上，云南电网是异步电网，而本文在分析新能源参与电网 AGC 策略时，没有考虑到异步电网以及直流 FLC 对于系统频率的作用效果，因此，需要进一步建立更适合异步电网的新能源调频模型；

（2）本文在设计调频方案时，只分析了新能源参与 AGC 的控制策略，并没有考虑与系统一次调频进行配合，因此还需要深入研究高比例新能源系统的一二次联合调频方案。

参考文献

- [1] 郑超,马世英,申旭辉,等.强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J].电网技术,2017,41(08):2491-2498.
- [2] 许涛,励刚,于钊,等.多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J].电力系统自动化,2017,41(08):98-104.
- [3] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等.“9.19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J].电力系统自动化,2017,41(7):149-155.
- [4] 邓晖,楼伯良,华文,等.特高压直流闭锁后华东电网频率稳定特性研究[J].智慧电力,2017,45(8):39-44.
- [5] 陈亦平,李崇涛,杨若朴,等.云南异步电网中频率振荡的分段线性模型分析方法[J].电力系统自动化,2020,44(06):186-197.
- [6] 郭洪芹.异步联网对云南电网稳定特性影响研究[J].云南电力技术,2015,43(05):12-14.
- [7] 田璇.水电机组水力特性对一次调频性能的影响研究[D].长沙理工大学,2017.
- [8] 高晓光,李小军,唐戡群.水电机组一次调频性能优化研究[J].长江科学院院报,2016,33(10):145-148.
- [9] 菅学辉.高比例可再生能源并网下的调峰调频机制研究[D].山东大学,2018.
- [10] 姜胜,陈启卷,蔡维由.水轮机调速器参数仿真寻优策略[J].中国电机工程学报,2008(03):102-106.
- [11] 张江滨,李华,谢辉平.水电机组一次调频控制系统分析与功能完善[J].水力发电学报,2009,28(06):206-213.
- [12] 孔德宁,蒋亮,李宁,等.龙滩电站一次调频功能的实现及试验分析[J].水电自动化与大坝监测,2009,33(04):19-23.
- [13] 周永杰,谭雅岚,张江滨.电网遭受扰动后水电机组一次调频对电网频率的影响[J].电网与清洁能源,2010,26(11):85-89.
- [14] 范李平,杨力森,武粉桃.风电场并网对电力系统稳定性影响[J].电网与清洁能源,2009,25(06):58-61.
- [15] Gillian Lalor, Alan Mullane, Mark o' Malley'. Frequency Control and Wind Turbine Technologies. IEEE Trans on Power,2005,20(4):1905-1913.
- [16] 计崔.大型风力发电场并网接入运行问题综述[J].华东电力,2008(10):71-73.
- [17] Curtice, D H, Reddoch TW. An assessment of load frequency control

- impacts caused by small wind turbines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1983,102(1):162-170.
- [18] Banakar H, Changling Luo, Boon TeckOoi. Impacts of wind power minute to minute variation on power system operation. IEEE Transaction on Power Systems,2008,23(1):150-160.
- [19] 张昭遂,孙元章,李国杰,等.超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J].电力系统自动化,2011,35(17):20-25+43.
- [20] 刘沛灿,朱晓荣.双馈感应发电机频率控制策略的研究及对比[J].电力科学与工程,2011,27(11):12-17.
- [21] 何成明,王洪涛,孙华东,等.变速风电机组调频特性分析及风电场时序协同控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(09):1-6+59.
- [22] 柳伟,顾伟,孙蓉,等.DFIG-SMES 互补系统一次调频控制[J].电工技术学报,2012,27(09):108-116.
- [23] 朱晓荣,赵猛,王毅.双馈感应风力发电机组复合频率控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(08):20-24+29.
- [24] De Almeida R G, Pecas Lopes J A. Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation. IEEE Transactions on Power System,2007,22(3):944-950.
- [25] Chowdhury B H, Ma H T. Frequency regulation with wind power plants. Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE,2008,1-5
- [26] Emmanouil Loukarakois, Ioannis Margaritis, Panayiotis Moutis. Frequency control support and participation methods provided by wind generation.2009 IEEE Electrical Power &Energy Conference. Montreal, 2009, 1-6.
- [27] Zertek A, Verbic G, Pantos M. Participation of DFIG wind turbines in frequency control ancillary service by optimized rotational kinetic energy. 2010 7th International Conference on the European Energy Market Madrid,2010,1-6.
- [28] Erlich I, Wilch M. Primary frequency control by wind turbines. Power and Energy Society General Meeting, IEEE. Minneapolis,2010,1-8.
- [29] 韩肖清,董桐宇,程昱舒,等.变速恒频风电机组的有功-频率控制[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(06):57-61.
- [30] 李立成,叶林.变风速下永磁直驱风电机组频率—转速协调控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(17):26-31.
- [31] Moore I, Ekanayake J. Frequency response from wind turbines.

- Universities Power Engineering Conference(UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International.IEEE,2009:1-5.
- [32] Keung P K, Li P.Ooi B T. Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1); 279-287.
- [33] Mullane A, O'Malley M. Inertial response of induction-machine-based wind turbines. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3); 1496-1503.
- [34] Ramtharan G, Ekanayake J B, Jenkins N. Frequency support from doubly fed induction generator turbines, JET Renew, Power Gener,2007,1(1):3-9
- [35] Teninge A, Jecu C, Roye I ,et al. Contribution to frequency control through wind turbine inertial energy storage. IET Renewable Power Generation.2009.3(3):358-370
- [36] J Morten J, de Naan S W H, Kling W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control. IEEE Transactions on Power Systems.2006,21(1):433-434
- [37] MISHRA S, ZARINA P P, SEKHAR P C. Anovel controller for frequency regulation in a hybrid system with high PV penetration[C]//IEEE Power&Energy Society General Meeting,July21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada: 1-5.
- [38] ZARINA P P, MISHRA S,SEKHAR P C. Deriving inertial response from a non-inertial PV system for frequency regulation[J].IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, December16-19, 2012,Bengaluru,India:1-5.
- [39] NEELY J,JOHNSON J,DELHOTAL J, et al. Evaluation of PV frequency-Watt function for fast frequency reserves[J].IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC),March20-24, 2016, LongBeach, CA, USA: 1926-1933.
- [40] NANOUS I, PAPA KONSTANTINOU A G, PAPA THANASSIOU S A. A generic model of two-stage grid-connected PV system with primary frequency response and inertia emulation[J]. Electric Power System Research,2015(127):186-196.
- [41] XIN Huanhai, LIU Yun, WANG Zhen, et al. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013,4(4):985-993.
- [42] 叶婧,林涛,张磊,毕如玉,徐遐龄.考虑动态频率约束的含高渗透率光伏电源的孤立电网机组组合[J].电工技术学报,2017,32(13):194-202.
- [43] 钟诚,周顺康,严干贵,丁茂生.基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制

- 策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(05): 1013-1024.
- [44] ZARINA P P, MISHR A S, SEKHAR P C. Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system[J]. International Journal of Electrical Power&Energy Systems, 2014, 60: 258-267.
- [45] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 王展, 葛乐. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [46] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 李婷婷. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16+38.
- [47] KABIRI D, SHIANI P, NAEEM B. Improving system frequency in smart grids in presence of wind and PV generation units using flywheel energy storage system[J]. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 2015, 4(1): 116-123.
- [48] 田春光, 田利, 李德鑫, 等. 基于混合储能系统跟踪光伏发电输出功率的控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 75-83.
- [49] 付爱慧, 张峰, 张利, 等. 考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网储能配置策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 53-61+185+227-231.
- [50] DELILLE G, FRANCOIS B, MALARANGE G. Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 931-939.
- [51] DA TTA M, SENJYU T, YONA A, et al. A frequency-control approach by photovoltaic generator in a PV-diesel hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 559-571.
- [52] 张羽, 李咸善. 基于频率调整策略的微电网多目标优化自愈控制[J]. 电网技术, 2017, 41(03): 831-839.
- [53] 刘云, 卢泽汉, 章雷其, 等. 光伏发电系统与可投切负荷协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 10-16.
- [54] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [55] 温焯婷, 戴瑜兴, 毕大强, 等. 一种电网友好型光储分布式电源控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(02): 464-476.
- [56] 严干贵, 张礼珏, 赵伟哲, 等. 基于虚拟同步发电机的光-储调频控制策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(03): 1-6.

- [57] DA TTA M, ISHIKAW A H,NAITOH H.LFC by coordinated virtual inertia mimicking and PEVs in power utility with MW-class distributed PV generation[C]//IEEE 13th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics,June10-13,2012,Kyoto,Japan:1-8.
- [58] DA TTA M, ISHIKAW A H, NAITOH H. Frequency control improvement in a PV-diesel hybrid power system with a virtual inertia[C]//IEEE 7th Conference on Industrial Electronics and Applications, July 18-20 , 2012 ,Singapore,Singapore:1167-1172.
- [59] WANG X, YUE M, MULJADI E. PV Generation enhancement with a virtual inertia emulator to provide inertial response to the grid[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September14-18, 2014, Pittsburgh, PA, USA:17-23.
- [60] WAFFENSCHMIDT E, HUI R S Y. Virtual inertia with PV inverters using DC-link capacitors[C]//18th European Conference on Power Electronics and Applications, September5-9, 2016, Karlsruhe, Germany:1-10.
- [61] HOSSEINIPOUR A, HOJABRI H. Virtual inertia control of PV systems for dynamic performance and damping enhancement of DC microgrids with constant power loads[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(4): 430-438.
- [62] SALMANS, AIX, WUZ. Design of algorithm based MPPT charger controller for a stand-alone 200WPV system[J]. Protectionand Control of Modern Power Systems,2018,3(3):259-266.DOI:10.1186/s41601-018-0099-8.
- [63] GB/T19964-2012,光伏电站接入电力系统技术规定[S] . 中国国家标准化管理委员会, 2012
- [64] 周顺康.风光发电参与电网频率调节的主动功率控制策略研究[D].东北的电力大学, 2018.
- [65] Bo Yang, Tao Yu, Hongchun Shu, et al. Democratic joint operations algorithm for optimal power extraction of PMSG based wind energy conversion system. Energy Conversion and Management[J].vol.159, pp.312-326,2018.
- [66] Bo Yang, Linen Zhong, Xiaoshun Zhang,et al. Novel bio-inspired memetic salp swarm algorithm and application to MPPT for PV systems considering partial shading condition[J].Journal of Cleaner Production.vol.215, pp.1203-1222,2019.
- [67] Mirjalili, S. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm[J]. Knowledge Based Systems. 89, 228-249,2015.

致谢

受华北电力大学浓厚严谨的学术氛围的熏陶,伴随着硕士论文的完成,我的研究生生涯即将画上句号。这将是我人生中非常珍贵和难以割舍的一段学习经历,在这三年中华电不仅教会了我很多专业知识,也进一步武装了我的思想,为我接下来步入社会进入工作生涯做了充足的铺垫。感谢母校陪伴了我三年的成长,感谢华电所有的老师和校内工作人员,为我们莘莘学子提供了高质量高效率的生活和学习环境,愿母校今后培育出更多为祖国所需要的优秀青年,永远年轻,永远充满活力!

天涯海角有尽处,只有恩师无穷期。首先,我怀着非常真挚的情感,感谢我的校内导师刘崇茹教授。刘教授认真务实、严谨自律的治学态度一直是我学习路上的榜样和动力,引领着我走向正确的方向。在外出参加联合培养的期间,在因为疫情无法返校的时间内,刘教授都一直在关心着我的学习和生活,在很多次与刘教授沟通的时候,我无一次不被刘教授严谨的态度和悉心的关怀所感动。今后,我将一直以刘教授为榜样,在工作和生活中鞭策激励自己,向着更优秀更美好的方向前进。也祝愿刘教授学术工作硕果累累,桃李八方,永远健康。

感谢云南电科院研究生工作站给了我联合培养的机会,在站期间,我向着今后的工作更加进了一步。在这里,每次跟随领导、工程师出差的时候,我总能见识到各种工作环境,接触到不一样的实际问题和工作情况,为以后的工作打下了基础;每次参加站里、院里的学术交流的时候,我总能为专家们的知识碰撞而惊叹,我也接触学习到了更加广阔和实际的知识。感谢工作站张少泉主任、陆海主任在工作上对我耐心指导和帮助,感谢陈晓云老师、张筱雨老师在生活上对我关怀备至。祝愿云南电科院能继续在中国电力行业发光放彩,输送更多优秀的工程人才,也祝愿各位领导、老师工作顺利、生活顺心。

饮其流者怀其源,感谢我的企业导师李胜男教高。在站期间,李所帮助我提供思路、确定选题方向,不厌其烦地帮助我修改完善,也帮我克服各种难关。尽管李所非常忙碌,但每次我有问题的时候,李所总是抽出时间第一时间为我答疑解惑,还主动询问我学习上的困难。为了能更好的吸收知识,李所多次带我进实验室,教我实操方法。在李所的指导下,我收获了更加丰富实际的专业知识,提高了工作能力。祝愿李所能在在工作领域能有更多的成就,事业顺心,步步高升!

感谢我学习生涯中遇到的每一位小伙伴。感谢同门牛纪伟、李竹青,在我不

在校期间帮助我提交文件、办手续，在学习上也不断帮助我；感谢崔婧、赵之晗同学，在云南电科院研究生工作站期间给我的陪伴，在远离家乡的地方给我最温暖的关心和帮助；感谢杜涵、赖煊平同学，在撰写论文的时候也给了我很多指导和鼓励。感谢我的家人，给我物质上的保障，他们的温暖的关心永远都是我最坚强的后盾。

最后，感谢各位参加评审的专家们，能在百忙之中工作之余给出宝贵的意见，让我的知识体系更加丰富和完善。

再次感谢我在这几年中遇到的每个人，谢谢你们的陪伴和帮助！

