

---

华北电力大学

专业硕士学位论文

含光伏发电系统的负荷模型参数辨识及电网  
稳定性研究

Parameter identification of load model with  
photovoltaic power generation system and study on  
power grid stability

关皓闻

2022 年 6 月

---

国内图书分类号：TM743

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

# 含光伏发电系统的负荷模型参数辨识及电网 稳定性研究

硕士研究生：关皓闻

导师：盛四清 教授

企业导师：张文朝 教授级高工

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：电气与工程学院

答辩日期：2022年6月

授予学位单位：华北电力大学

---

Classified Index: TM743

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Professional Master's Degree

**Parameter identification of load model with  
photovoltaic power generation system and study on  
power grid stability**

<b>Candidate:</b>	Guan Haowen
<b>Supervisor:</b>	Prof. Sheng Siqing
<b>Enterprise mentor:</b>	Zhang Wenchao
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Speciality:</b>	Electrical Engineering
<b>Cultivation ways:</b>	Full-time
<b>School:</b>	School of Electrical and Electronic Engineering
<b>Date of Defence:</b>	June, 2022
<b>Degree-Conferring-Insition:</b>	North China Electric Power University

## 摘 要

随着可再生能源发电的不断发展，我国对可再生能源的重视程度不断增强，以太阳能、风能为典型的可再生能源逐渐成为新型电力系统的主要能源形式。分布式光伏装机容量的不断增加，一方面会对电力系统稳定性带来一定的影响，另一方面可能导致传统的负荷模型不能很好的描述系统的动态特性。而负荷模型对电力系统动态仿真具有重要意义，不同的负荷模型对电力系统的稳定性有着不同程度的影响。因此，研究含光伏发电系统的负荷模型及分析其对电网稳定性的影响具有重要意义。

基于上述背景，本文主要研究以下几方面的内容：

(1)介绍负荷模型和光伏发电系统模型的结构，基于 PSD-BPA 平台搭建含分布式光伏发电的配网系统，研究在不同的光伏渗透率下综合负荷模型对系统的动态描述能力，并建立含光伏发电系统的综合负荷模型。

(2)围绕负荷模型参数辨识工作，提出混沌优化算法与海鸥优化算法相结合的混沌海鸥优化算法，并将其应用于含光伏发电系统的负荷模型参数辨识的实例中，以拟合误差和平均最优位置为指标，与海鸥优化算法和经典粒子群算法进行比较，证明了算法的优越性与实用性。

(3)研究负荷模型参数对电力系统电压稳定的影响。基于单机-负荷系统研究负荷模型参数对电压稳定性的影响，并分析电压失稳机理，表明故障后感应电动机滑差增大导致吸收较多无功，滑差不能恢复而引起电压失稳。以 2024 年网架下的南疆电网受电极限为指标进行参数灵敏度分析，结果表明静态负荷构成和马达占比对电力系统电压稳定性的影响较大，马达负载率、马达惯性时间常数、定子电抗和配网等值阻抗对电压稳定性的影响相对较小。

(4)研究分布式光伏对电力系统电压稳定性的影响。通过 PSD-BPA 平台搭建含水火光的受端系统，分析光伏渗透率、系统惯量和低电压穿越控制策略对电压稳定性的影响。结果表明系统惯量及常规机组出力不变，光伏出力增加，系统暂态电压稳定性提高；系统惯量及电源总出力不变，光伏出力增加、常规电源出力减小，系统暂态电压稳定性提高；电源总出力不变，光伏发电替代常规机组导致系统惯量减少，系统暂态电压稳定性降低；低电压穿越期间增大有功出力或者增大无功出力，均可以提高系统暂态电压稳定性。

**关键词：**负荷模型；分布式光伏；参数辨识；海鸥优化算法；电力系统稳定性

## Abstract

With the continuous development of renewable energy generation, China's attention to renewable energy has been increasing, and renewable energy, typically solar and wind energy, as the main form of grid connection, has gradually become an unstoppable development trend of new power systems. The capacity of distributed photovoltaic leads to the traditional load model cannot well describe the dynamic characteristics of the system. And the load characteristics play an important role in the system simulation calculation results, and different load models have different degrees of influence on the system stability problems. Therefore, it is important to study the load models of PV-containing systems and analyze their effects on grid stability.

Based on the above background, this paper focuses on the following aspects.

(1) Introducing the structure of load model and PV generation system model, building a distribution network system containing distributed PV generation based on PSD-BPA platform, studying the dynamic description capability of the integrated load model for the system under different PV penetration rates, and establishing an integrated load model for the system containing PV generation.

(2) The Chaotic Seagull Optimization algorithm, which combines the Chaotic Optimization algorithm and the Seagull Optimization algorithm, is proposed for the identification of the load model parameters of the PV-containing system, and the important parameters to be identified are analyzed and compared with the Seagull Optimization algorithm and the classical particle swarm algorithm to prove the superiority and feasibility of the algorithm.

(3) To study the influence of load model parameters on the voltage stability. The influence of load model parameters on voltage stability is studied based on the single machine-load system, and the mechanism of voltage instability is analyzed, showing that the increase of induction motor slip leads to absorbing more reactive power and the slip cannot be recovered thus causing voltage instability. Parameter sensitivity analysis is carried out with the 2024 grid under the southern border power grid receiving limit as the index, and the results show that the static load composition and motor ratio have a large impact on voltage stability, and the motor load factor, inertia time constant, rotor reactance and distribution impedance have relatively small impact on voltage stability.

(4) To study the effect of large-scale PV power access on power system power angle stability. Based on the equal area rule, we analyze the effect of PV access on the acceleration energy and deceleration energy of the unit, build a multi-machine-infinity system containing water, fire and light through the PSD-BPA platform, and analyze the effects of PV penetration rate, system inertia and low-voltage ride-through control strategy

on the power angle stability. The results show that the system inertia and conventional unit output is unchanged, PV output increases, and the transient angle of attack stability decreases; the system inertia and total power supply output is unchanged, PV output increases and conventional power supply output decreases, and the transient stability of the system improves; the total power supply output is unchanged, and PV generation replaces conventional unit, resulting in the reduction of system inertia and the transient stability of the system decreases; the active output decreases or reactive output increases during LVRT, and the transient stability of the system improves. The system transient stability is improved by increasing the reactive power output during LVRT.

**Keywords:** Load model; Distributed photovoltaic; Parameter identification; Seagull optimization algorithm; Power system stability

# 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 负荷模型结构.....	2
1.2.2 负荷建模方法.....	2
1.2.3 负荷模型参数辨识.....	3
1.2.4 负荷模型对系统稳定性影响.....	3
1.3 本文的主要工作.....	4
第 2 章 含光伏发电系统的负荷模型 .....	6
2.1 引言.....	6
2.2 负荷模型.....	6
2.2.1 静态负荷模型.....	6
2.2.2 动态负荷模型.....	7
2.2.3 综合负荷模型.....	8
2.3 光伏发电系统模型.....	9
2.3.1 光伏阵列模型.....	9
2.3.2 直流侧电容动态模型.....	11
2.3.3 并网逆变器模型.....	11
2.4 含光伏发电系统的综合负荷模型 .....	12
2.4.1 分布式光伏对系统动态特性的影响.....	12
2.4.2 含光伏发电系统的负荷模型结构.....	13
2.5 本章小结.....	14
第 3 章 基于混沌海鸥优化算法的负荷模型参数辨识 .....	15
3.1 引言.....	15
3.2 混沌海鸥优化算法.....	15
3.2.1 混沌优化算法.....	15
3.2.2 海鸥优化算法.....	16
3.2.3 混沌搜索空间和变异概率调整.....	17
3.3 含光伏发电系统的综合负荷模型需要辨识的参数 .....	18
3.4 基于混沌海鸥算法的负荷模型参数辨识 .....	19
3.5 算例分析.....	20
3.6 本章小结.....	24
第 4 章 负荷模型对电压稳定性的影响 .....	26
4.1 引言.....	26

4.2 单机-负荷算例 .....	26
4.2.1 单机-负荷系统 .....	26
4.2.2 负荷模型参数的影响.....	27
4.3 电压失稳机理.....	31
4.4 参数灵敏度分析.....	32
4.4.1 南疆电网网架结构.....	32
4.4.2 负荷模型参数灵敏度分析.....	33
4.5 本章小结.....	37
第5章 分布式光伏对电压稳定的影响 .....	38
5.1 引言.....	38
5.2 分布式光伏对电压稳定性的影响分析 .....	38
5.2.1 光伏渗透率对电压稳定性的影响.....	38
5.2.2 系统惯量对电压稳定性的影响.....	40
5.2.3 低穿有功控制策略对电压稳定性的影响 .....	41
5.2.4 低穿无功控制策略对电压稳定性的影响 .....	43
5.3 低电压穿越控制策略改进建议 .....	46
5.4 本章小结.....	46
第6章 结论与展望 .....	47
参考文献.....	49



# 第1章 绪论

## 1.1 课题研究背景及意义

随着传统能源的逐渐枯竭以及环境的恶化,人们意识到开发利用可再生能源发电已迫在眉睫。以太阳能、风能为典型的可再生能源逐渐成为新型电力系统的主要能源形式。光伏发电作为我国“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”承诺下电网转型的首选电源,规模呈指数级增长。此外,由于光伏扶贫是我国一项基本政策,光伏发电在广大贫困地区快速发展,装机规模持续增大<sup>[1-4]</sup>。

截至 2020 年,中国光伏市场累计装机量 253GW,2020 年新增装机量为 48.2GW,同比增长 60%;2020 年中国光伏发电量为 2605kWh,同比增长 16.2%。太阳能是典型的清洁能源,基于太阳能的分布式光伏的大量并网是电力系统的发展趋势<sup>[2-3]</sup>。光伏发电的大规模并网,一方面会影响电力系统的稳定性,另一方面可能会导致配电网的动态特性发生变化,配电网变成有源网络,分布式光伏和负荷共同主导配电网的动态特性,从而可能会影响电网的安全稳定运行<sup>[5-8]</sup>。

电力系统动态仿真为电力部门规划设计、调度运行、电网特性研究、安全稳定控制分析提供重要的数据和分析支持,电力系统动态仿真的结果必须与实际相符才有意义<sup>[9]</sup>。仿真的最基本条件就是元件的数学模型,负荷模型作为基本的元件模型,其准确程度直接影响电力系统动态仿真的结果,负荷建模是电力系统动态仿真的前提。

参数辨识是负荷建模的核心。传统的参数辨识方式多以线性为主,主要包括了最小二乘估计、卡尔曼滤波等方法,这种方法对线性模型的辨识效果较好<sup>[10]</sup>。非线性的参数辨识方法主要以优化问题为依据,即在既定的目标误差函数下,找出一个解使目标的偏差达到最小化,非线性的参数辨识代表方法主要包括遗传算法、随机搜索法和模拟退火算法等<sup>[11]</sup>。负荷模型参数辨识作为非线性优化问题,采用智能算法处理这类问题往往效果较好。

负荷特性对电力系统的稳定性具有重要影响。负荷特性对电力系统暂态稳定、动态稳定和电压稳定均有不同程度的影响,在某些极端的条件下,不同的负荷特性和负荷模型可能会产生不同的结果。1996 年夏天发生在北美的两次大事故,事后做事故仿真重现时,发现只有将原有的恒阻抗模型改为感应电动机加上静态负荷后,才能和实际的结果保持一致。这说明负荷模型对电力系统稳定性具有重大影响<sup>[12]</sup>。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 负荷模型结构

仿真的首要条件就是元件的数学模型，元件模型直接影响电力系统仿真的准确度。随着电力系统的快速发展，电力系统越来越复杂，规模越来越大，电网稳定性问题日益凸显。对于电力系统运行仿真来说，负荷特性不可忽视，严重情况下，不同的负荷特性会产生不同的仿真结果。

电力系统的负荷模型主要分为三种，即静态负荷模型、经典负荷模型(classic load model,简称 SLM 模型)和综合负荷模型(synthesis load model,简称 SLM 模型)<sup>[13-14]</sup>。最开始应用在电力系统运行仿真上的负荷模型是静态负荷模型，由于模型并未考虑感应电动机的影响，在实际应用时静态负荷模型具有较大的局限性<sup>[15-16]</sup>。由于静态负荷模型不能更好的应用于电力系统运行仿真中，文献[17]提出了一种计及感应电动机和静态负荷的负荷模型，称为经典负荷模型（CLM）。鉴于之前的模型并未计及配网等值阻抗的影响，文献[18]考虑配网等值阻抗的影响，提出一种计及配网等值阻抗的综合负荷模型，即 SLM 模型。文献[19-20]综合考虑配电网调压和配电网结构的影响，对综合负荷模型进行了改进。

关于考虑光伏发电系统接入配电网的系统动态特性方面，文献[21]提出了一种负荷模型结构，即异步发电机并联 ZIP 模型，将分布式电源和动态负荷等效为一个异步电机，通过负载率的正负来判别异步电机的运行模式。文献[22-23]建立了含小电源的配电网动态等值模型，在综合负荷模型的虚拟母线上增加一个有功电源。文献[24]考虑光伏发电系统对配电网动态特性的影响，将分布式光伏接入 SLM 模型的虚拟母线。

### 1.2.2 负荷建模方法

大体上负荷建模的方法可以分为两种，一种为统计综合法，另一种则为总体测辨法<sup>[25]</sup>。沿着这两条路，电力系统负荷建模取得巨大的成果。

统计综合法就是根据试验获取一些元件的动态特性，根据动态特性推导出其数学模型；之后根据某种特殊时刻各类负荷的比例总结出其负荷模型<sup>[26]</sup>。LOADS YN 软件为其中的代表。

总体测辨法就是以实测数据为基础，通过参数辨识方法来确定模型的参数，其关键为参数辨识方法<sup>[27]</sup>。由于现有的故障录波系统、PMU（phasor measurement unit）测量系统等监控测量系统可以提供数据基础，并且和统计综合法相比工作量比较小，总体测辨法在负荷建模领域中应用较多<sup>[28]</sup>。文献[29-30]利

用 PMU 数据、小扰动数据进行负荷模型参数辨识；文献[31]处理用于参数辨识的实测数据，结果表明加工处理后可以减小辨识误差。文献[32]根据参数的重要程度确定需要辨识的参数，减少了参数辨识的维度，提高了参数辨识的准确度。

### 1.2.3 负荷模型参数辨识

负荷建模的核心是参数辨识。传统的参数辨识方法多以线性为主，主要包括最小二乘估计、卡尔曼滤波等方法，此类方法对于线性模型往往效果较好<sup>[10]</sup>。非线性的参数辨识方法大多以优化为基础，即在给定的目标误差函数下，寻找一组解使得目标误差函数最小，代表方法有遗传算法、随机搜索法以及模拟退火算法<sup>[11]</sup>。负荷模型参数辨识是作为非线性的优化问题，采用智能算法处理这类问题往往效果较好。文献[33]提出可以应用于动态负荷模型的改进算法，该算法收敛性能强。文献[34-35]对遗传算法进行改进，通过对选择算子、交叉算子和变异算子三种算子的改进设计提高了收敛速度，并且可以提升辨识结果的稳定性。文献[36]考虑新能源出力和负荷不确定性，提出一种适用于不确定性配电网重构的改进遗传算法。文献[37]利用混沌优化算法的局部搜索能力，对粒子群算法进行优化，结果表明可以提高算法的收敛速度。文献[38]针对微分进化算法进行静态负荷模型参数辨识收敛速度慢、种群规模大的问题，提出一种适合动态负荷模型参数辨识的微分进化算法。文献[39]提出了混沌与量子粒子群算法相结合的负荷模型参数辨识方法，可以提高精度及收敛速度。文献[40]针对蚁群算法容易陷入局部最优的缺点和混沌算法遍历性和随机性的优点，把混沌算法引入到了蚁群算法中，提出了一种适用于负荷模型参数辨识的混沌蚁群混合算法。

由于参数辨识范围的选取对参数的辨识效果影响很大，文献[41]提出了负荷模型参数辨识范围的调整方法，首先根据动态过程中轨迹灵敏度的大小选择要调整的参数对象、然后进一步依据动态轨迹灵敏度的变化特点调整参数的辨识范围。文献[42]提出一种模型参数的辨识策略：将低灵敏度且非时变的参数固定为聚合值，对于高灵敏且时变的参数，在聚合值附近采用遗传算法进行辨识。

### 1.2.4 负荷模型对系统稳定性影响

负荷模型对电力系统稳定性的计算结果具有重要影响，极端方式下，不同的负荷特性和负荷模型可能会产生不同的结果，从而影响电力系统运行仿真的准确度<sup>[43-45]</sup>。

文献[46]分别用恒功率模型、恒阻抗模型和纯马达模型三种模型对暂态稳定进行分析，结果表明纯马达模型的稳定性最优，恒功率模型最不利于稳定性。对于功角稳定性而言，负荷模型通过作用于机组上的过剩转矩影响系统的功角稳定

性<sup>[45]</sup>。文献[47]表明不同的负荷模型对小干扰稳定有着不同的影响。文献[48]通过单机无穷大系统研究静态负荷模型对电力系统动态稳定的影响。

负荷模型和电力系统电压稳定性的联系最为紧密，负荷模型对电力系统电压稳定性具有较大影响。电力系统电压稳定性由发电机组的输出功率与负荷需求功率之间的关系决定<sup>[49]</sup>，负荷特性不仅直接影响电压稳定的结果，还会对电压失稳的进程产生重要的影响<sup>[50]</sup>。文献[51]运用连续潮流法研究静态负荷模型对电力系统电压稳定性的影响，但是并没有考虑感应电动机的影响使得结果不够准确。文献[52]采用恒功率负荷模型，并分析其对静态电压稳定性的影响，最后提出了一种静态电压稳定判据。文献[53]研究感应电动机对静态电压稳定性的影响，表明电动机负荷不利于系统电压稳定性。上述文献均分析负荷模型对静态电压稳定的影响，基于暂态电压稳定对负荷模型的研究较少，因此文献[54]考虑了感应电动机负荷对电压稳定性的影响，由于感应电动机采用的是一阶模型，结果不够准确。文献[55]使用综合 WALVE 负荷模型研究模型参数对交直流混联系统电压稳定性的影响，但此模型只可用于对电压失稳机理的研究。

### 1.3 本文的主要工作

上述文献在负荷模型方面已做了诸多研究，但在负荷建模及对系统稳定性的影响方面仍可继续研究。因此，本文建立含光伏发电系统的综合负荷模型，提出混沌海鸥优化算法并将其应用于负荷模型参数辨识，分析负荷模型参数对电力系统电压稳定性的影响，并研究光伏发电大规模接入对电力系统功角稳定性的影响，主要内容如下：

(1) 基于 PSD-BPA 电力系统分析软件工具，根据负荷模型结构和光伏发电系统的模型结构及工作原理，搭建含分布式光伏发电的配网系统，分析大规模分布式光伏接入对系统动态特性的影响，发现原有的综合负荷模型不能准确的描述系统的暂态响应，因此建立含光伏发电系统的综合负荷模型。

(2) 针对负荷模型参数辨识方法精度低和收敛速度慢的问题，提出混沌优化算法与海鸥优化算法相结合的混沌海鸥优化算法。将该算法应用于含光伏发电系统的负荷模型参数辨识的实例中，分析需要辨识的重要参数，以平均位置和拟合误差为指标，与海鸥优化算法和经典粒子群算法进行比较，证明了算法的优越性与可行性。

(3) 基于单机-负荷系统研究负荷模型参数对电压稳定性的影响。分析电压失稳机理，发现故障后感应电动机滑差增大导致吸收较多无功，滑差不能恢复从而引起电压失稳。以 2024 年网架下的南疆电网受电极限为指标进行参数灵敏度分析，

结果表明静态负荷构成和马达比例对电压稳定性的影响较大，马达负载率、惯性时间常数、定子电抗和配网阻抗对电压稳定性的影响相对较小。

（4）仿真分析分布式光伏对电力系统暂态电压稳定性的影响。通过 PSD-BPA 平台搭建包含水火光的受端系统，研究光伏渗透率、系统惯量和低电压穿越控制策略对电压稳定性的影响。结果表明系统惯量及常规机组出力不变，光伏出力越高，暂态电压稳定性越高；系统惯量及电源总出力不变，光伏出力增加、常规电源出力减小，系统暂态电压稳定性提高；电源总出力不变，光伏发电替代常规机组导致系统惯量减少，系统暂态稳定性降低；低电压穿越期间有功出力增大或无功出力增大，系统暂态电压稳定性提高。

## 第2章 含光伏发电系统的负荷模型

### 2.1 引言

随着传统能源的逐渐枯竭以及环境的恶化，人们意识到开发利用可再生能源发电已迫在眉睫。太阳能作为典型的可再生能源逐渐被重视起来，基于太阳能的光伏发电受到广泛关注。

光伏发电系统会对系统的暂态特性产生一定的影响，在光伏渗透率达到一定程度后，传统的综合负荷模型将不能准确的描述系统的动态特性，从而对电力系统的仿真准确性产生影响。鉴于此，本章介绍负荷模型结构和光伏发电系统模型结构，研究光伏渗透率对系统动态特性的影响，发现原有的负荷模型并不能很好的描述高光伏渗透率系统的动态响应，因此建立含光伏发电系统的综合负荷模型。

### 2.2 负荷模型

#### 2.2.1 静态负荷模型

电力系统的潮流计算和静态安全分析主要使用静态负荷模型，静态负荷模型分为幂函数模型和多项式模型。

##### (1) 幂函数模型

当系统的电压和频率变化较小时，常使用幂函数模型，其表达式如式（2-1）所示：

$$\begin{cases} P_L = P_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{V_p} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{f_p} \\ Q_L = Q_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{V_q} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{f_q} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中：  $P_0$ 、 $Q_0$ 、 $U_0$ 、 $f_0$ ——稳态负荷有功功率、负荷无功功率、负荷所在母线电压幅值、负荷所在母线电压频率；

$P_L$ 、 $Q_L$ 、 $U$ 、 $f$ ——实际负荷有功功率、负荷无功功率、负荷所在母线电压幅值、负荷所在母线电压频率；

$V_p$ 、 $V_q$ ——有功电压指数、无功电压指数；

$f_p$ 、 $f_q$ ——有功频率指数、无功频率指数。

##### (2) 多项式模型

当系统的电压和频率变化较大时，常使用多项式模型，其表达式如式（2-2）所示：

$$\begin{cases} P_L = P_0 \left( Z_p \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + I_p \left( \frac{U}{U_0} \right) + P_p \right) (1 + L_p \Delta f) \\ Z_p + I_p + P_p = 1 \\ Q_L = Q_0 \left( Z_q \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + I_q \left( \frac{U}{U_0} \right) + P_q \right) (1 + L_q \Delta f) \\ Z_q + I_q + P_q = 1 \end{cases} \quad (2-2)$$

式中：  $Z_p$ 、 $I_p$ 、 $P_p$ ——恒阻抗负荷、恒功率负荷、恒电流负荷有功功率占比；

$Z_q$ 、 $I_q$ 、 $P_q$ ——恒阻抗负荷、恒功率负荷、恒电流负荷无功功率占比；

$L_p$ ——频率变化 1% 引起的有功功率变化百分数；

$L_q$ ——频率变化 1% 引起的无功功率变化百分数；

若忽略频率的影响，可以得到多项式模型如式（2-3）所示：

$$\begin{cases} P_L = P_0 \left( Z_p \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + I_p \left( \frac{U}{U_0} \right) + P_p \right) \\ Q_L = Q_0 \left( Z_q \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 + I_q \left( \frac{U}{U_0} \right) + P_q \right) \end{cases} \quad (2-3)$$

## 2.2.2 动态负荷模型

对于动态负荷，由于感应电动机占比较大，所以一般采用感应电动机模型作为动态负荷模型，感应电动机的等值电路如图 2-1 所示。

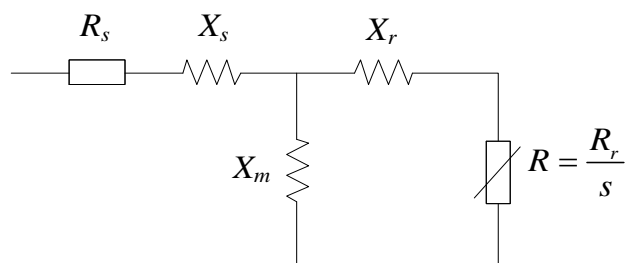


图 2-1 三阶感应电动机模型等值电路

感应电动机采用三阶机电暂态模型，其关系式为：

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} ([E'_d + (X - X')I_q] - w_b(w_r - 1)E'_q) \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} ([E'_q + (X - X')I_d] - w_b(w_r - 1)E'_d) \\ \frac{dw_r}{dt} = -\frac{1}{2T_j} (T_E - T_M) \\ T_E = E'_d I_d + E'_q I_q \\ T_M = (Aw_r^2 + Bw_r + C)T_0 \\ X = X_S + X_M, X' = X_S + \frac{X_M X_R}{X_M + X_R} \end{cases} \quad (2-4)$$

### 2.2.3 综合负荷模型

我国电力系统稳定计算大多使用综合负荷模型（SLM 模型），由静态负荷和动态负荷、配网阻抗和无功补偿四部分组成，其结构如图 2-2 所示。

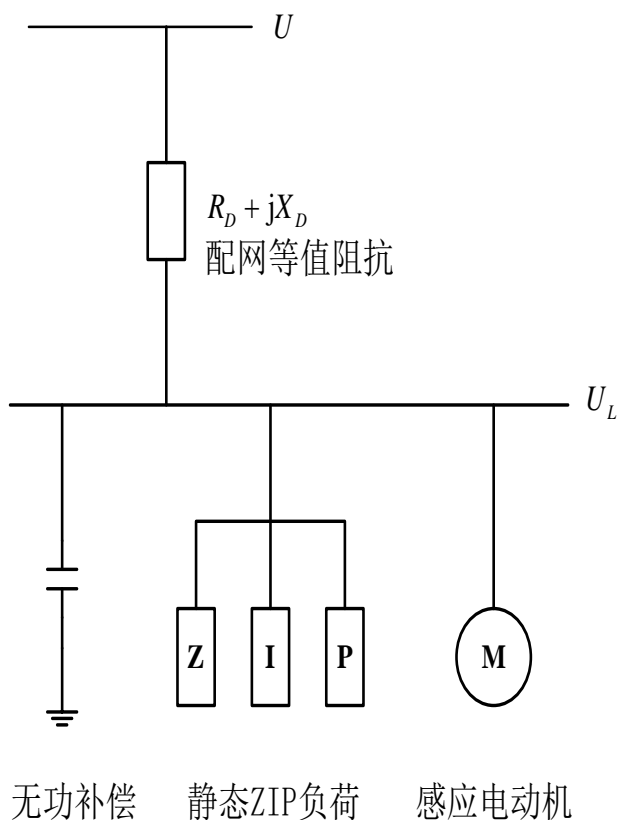


图 2-2 SLM 模型结构

其中静态负荷表达式如式（2-1）和（2-2）所示，一般情况下，由于频率的变化较慢，忽略频率的影响，则表达式如式（2-3）所示。感应电动机的表达式如式（2-4）所示。



## 2.3 光伏发电系统模型

光伏发电系统由光伏电池阵列、直流侧电容和并网逆变器组成，其结构如图 2-3 所示。

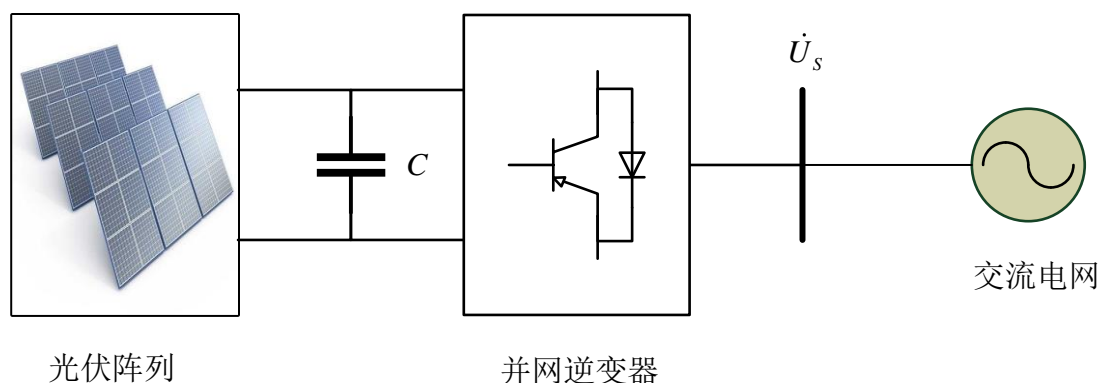


图 2-3 光伏发电系统模型结构

### 2.3.1 光伏阵列模型

光伏电池阵列由多个光伏电池串并联而成，其模型包括光伏电池模型和光伏阵列集成模型。光伏电池模型能够反映光伏电池的 I-V 输出外特性，光伏电池基于二极管模型的等效电路如图 2-4 所示：

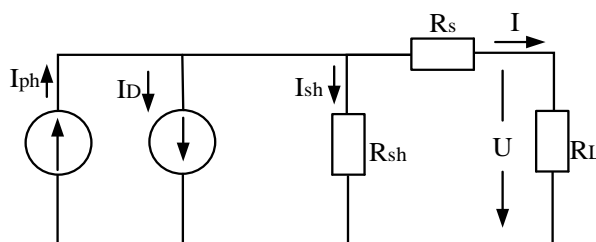


图 2-4 光伏电池等效电路

光伏电池的电流-电压特性表达式如式（2-5）所示：

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \\ I_D = I_0 \left( e^{\frac{U + IR_s}{AKT}} - 1 \right) \\ I_{sh} = \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \end{cases} \quad (2-5)$$

目前，工程中比较易于获得的光伏电池技术参数有： $I_{sc}$ （短路电流）、 $U_{oc}$ （开路电压）、 $I_m$ （最大功率点的负载电流）、 $U_m$ （最大功率点的负载电压）、光伏温度  $T$  和光照强度  $S$ 。首先对这些参数在实际温度和光照强度条件（标准电池温度  $T_{ref}(15^\circ\text{C})$  和标准光照强度  $S_{ref}(1000\text{W/m}^2)$ ）下进行折算：

$$\begin{cases} T' = T - T_{ref} \\ S' = S / S_{ref} - 1 \\ I'_{sc} = \frac{I_{sc} \cdot S}{S_{ref}} (1 + aT') \\ U'_{oc} = U_{oc} \cdot (1 - cT') \ln(e + bS') \\ I'_m = \frac{I_m \cdot S}{S_{ref}} (1 + aT') \\ U'_m = U_m \cdot (1 - cT') \ln(e + bS') \end{cases} \quad (2-6)$$

光伏阵列集成模型以单体光伏电池为基础，据光伏电池模型和串并联关系组合而成<sup>[56]</sup>，光伏阵列集成模型在光伏电池模型基础上进行一定的修正，如式(2-7)所示：

$$\begin{cases} I_{scc} = N_{se} \cdot I'_{sc} \\ I_{mm} = N_{se} \cdot I'_m \\ U_{occ} = N_{sh} \cdot U'_{oc} \\ U_{mm} = N_{sh} \cdot U'_m \end{cases} \quad (2-7)$$

式中： $I_{scc}$ ——光伏阵列的短路电流；

$U_{occ}$ ——光伏阵列的开路电压；

$I_{mm}$ ——光伏阵列的最大功率点电流；

$U_{mm}$ ——光伏阵列的最大功率点电压；

$N_{se}$ ——光伏电池的串联组数；

$N_{sh}$ ——光伏电池的并联组数。

然后根据式（2-8）计算光伏阵列的输出电流：

$$\begin{cases} I_L = I_{scc} [1 - C_1 (e^{\frac{U}{C_2 U_{occ}}} - 1)] \\ C_1 = (1 - \frac{I_{mm}}{I_{scc}}) (1 - C_1 (e^{\frac{U}{C_2 U_{occ}}})) \\ C_2 = \frac{(\frac{U_{mm}}{U_{occ}} - 1)}{\ln(1 - \frac{I_{mm}}{I_{scc}})} \end{cases} \quad (2-8)$$

### 2.3.2 直流侧电容动态模型

直流侧电容作为支撑电压的重要组成部分，其暂态特性会对光伏阵列的输出电流产生影响。其数学模型表达式如式（2-9）所示：

$$\begin{cases} i_c = I_L - \frac{P_L}{U_{dc}} \\ U_{dc} = \frac{1}{C} \int i_c dt \end{cases} \quad (2-9)$$

式中：  $P_L$ ——光伏阵列输出的有功功率；

$I_L$ ——光伏阵列输出的电流；

$i_c$ ——并网逆变器直流侧电容电流；

$C$ ——并网逆变器直流侧电容值；

$U_{dc}$ ——并网逆变器直流侧电压。

### 2.3.3 并网逆变器模型

逆变器是实现光伏发电系统并网的核心部件，将光伏阵列产生的直流电转换为交流电并入电网，光伏发电系统的暂态特性主要由逆变器决定。

有功控制采用恒直流电压控制，可以实现光伏的最大功率追踪；无功控制采用恒交流电压控制，利用换流器的冗余容量平衡无功，使得母线电压维持恒定。其控制模型如图 2-5、图 2-6 所示：

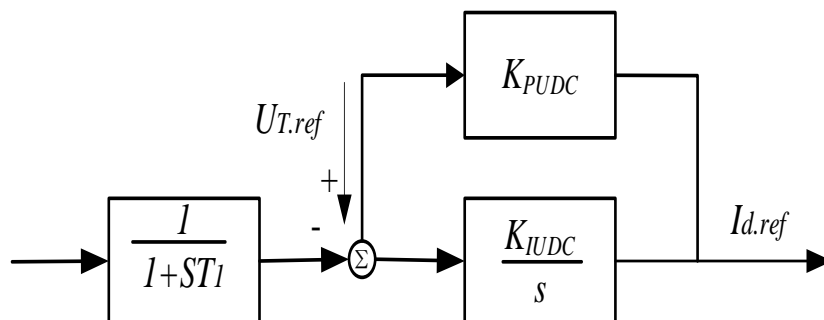


图 2-5 有功控制环

其中：  $U_{DC}$ ——光伏阵列直流侧输出电压；

$T_1$ ——测量时间常数；

$K_{PUDC}$ ——直流电压 PI 控制环节系数；

$K_{IUDC}$ ——直流电压 PI 控制环节时间常数；

$I_{d.ref}$ ——有功电流参考值。

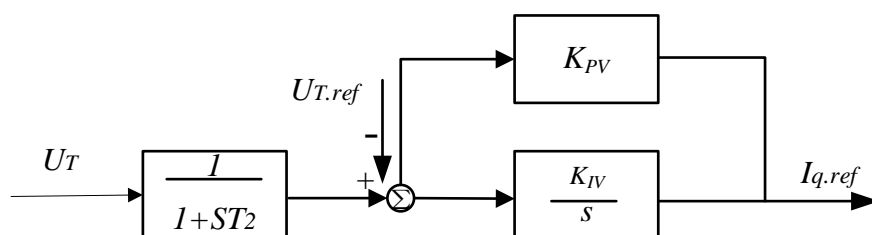


图 2-6 无功控制环

其中：\$U\_T\$——逆变器交流侧输出电压；  
 \$T\_2\$——测量时间常数；  
 \$K\_{PV}\$——交流电压 PI 控制环节系数；  
 \$K\_{IV}\$——交流电压 PI 控制环节时间常数；  
 \$I\_{q.ref}\$——无功电流参考值。

## 2.4 含光伏发电系统的综合负荷模型

### 2.4.1 分布式光伏对系统动态特性的影响

随着分布式光伏的大力发展，配电网的光伏渗透率不断提高，若不计分布式光伏的影响，SLM 模型可能不能更好的描述系统的动态特性，为了研究光伏渗透率对系统动态特性的影响，在 PSD-BPA 平台搭建如图 2-7 所示的单机无穷大系统，其中 BUS3 为单机无穷大系统的中点，含分布式光伏的配网通过 BUS3 接入系统。

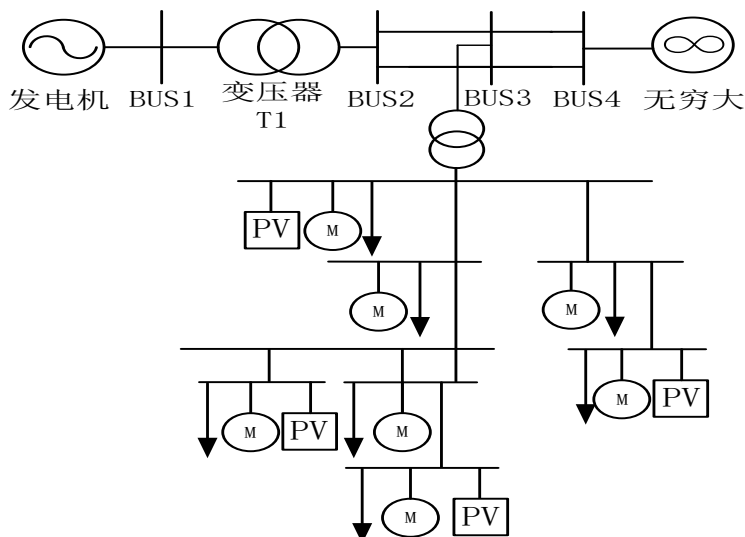


图 2-7 含分布式光伏的配电网仿真系统

设置 BUS2-BUS3 线路三相永久短路故障，故障点位于线路靠近 BUS2 侧，故障后 0.12S 切除故障，分别取光伏渗透率为 20%、40%、60%、80%，得到四种渗

透率下的有功功率动态曲线，与未考虑分布式光伏的综合负荷模型对比，其结果如图 2-8 所示。

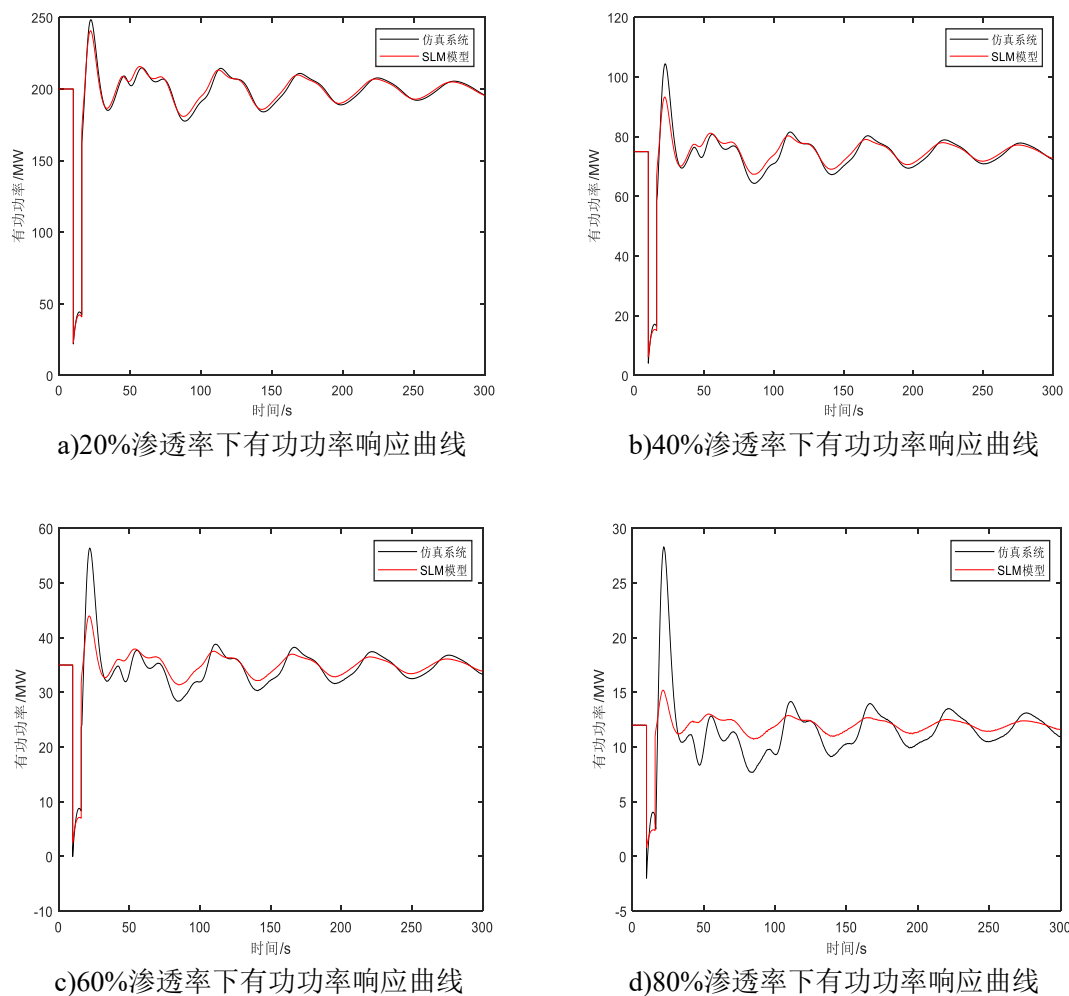
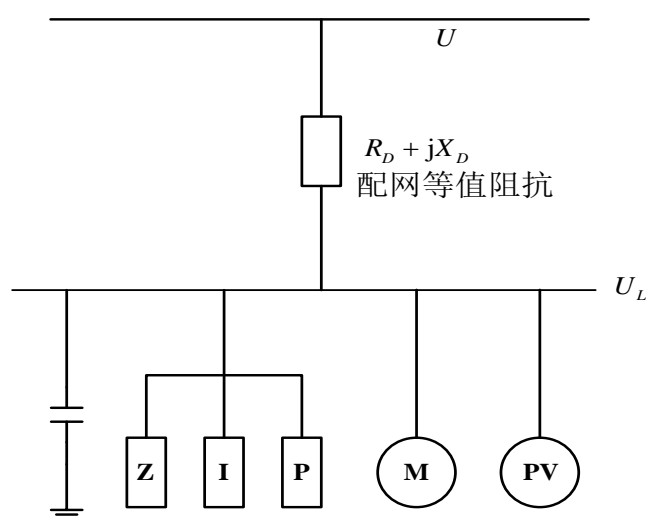


图 2-8 不同光伏渗透率下的有功功率响应曲线对比图

由图 2-8 可知，随着光伏的渗透率逐渐增大，传统的负荷模型由于并未考虑光伏的动态特性，不能准确的描述系统的暂态响应，因此需要建立包含光伏发电系统的综合负荷模型。

## 2.4.2 含光伏发电系统的负荷模型结构

通过上节的分析，可以得出结论：当光伏渗透率较大时，传统的 SLM 负荷模型并不能很好的描述系统的动态响应。因此，提出一种考虑分布式光伏的综合负荷模型，这种模型能够等效描述光伏发电系统的动态特性，是一种可以用于配电网广义负荷建模的简单有效模型。综合负荷模型结构如图 2-9 所示。静态负荷模型表达式如式 (2-3) 所示，动态负荷模型表达式如式 (2-4) 所示，光伏发电系统表达式如式 (2-7) 至式 (2-9) 所示。



无功补偿 静态ZIP负荷 感应电动机 光伏

图 2-9 含分布式光伏的综合负荷模型结构

## 2.5 本章小结

本章研究含分布式光伏发电系统的综合负荷模型，首先对负荷模型的种类和结构进行介绍，包括静态负荷模型、动态负荷模型和综合负荷模型，其中综合负荷模型在电力系统仿真中应用较多，然后介绍光伏发电系统的模型结构，包括光伏阵列模型、直流电容动态模型和并网逆变器控制模型。最后搭建含分布式光伏的配电网系统，研究光伏渗透率不断提高对系统动态特性的影响，结果表明随着光伏渗透率的不断提高，综合负荷模型（SLM）模型并不能很好的描述系统的动态特性，鉴于此，建立含光伏发电系统的综合负荷模型，为后续的参数辨识做提供模型基础。

## 第3章 基于混沌海鸥优化算法的负荷模型参数辨识

### 3.1 引言

负荷模型的参数确定主要分为两种方法，一种是统计综合法，另一种是总体测辨法。总体测辨法就是根据负荷的实测数据（功率、电压等）来确定模型结构和模型参数，使得模型响应能最好地拟合负荷实测响应数据<sup>[23]</sup>。由于总体测变法不需要知道负荷的结构、比例和参数，仅需要知道系统整体的响应便可以确定模型参数，描述系统的动态特性。因此本章采用总体测辨法完成模型参数的确定。

负荷模型参数辨识作为非线性优化问题，采用智能算法处理这类问题往往效果较好。海鸥优化算法基于海鸥的实际行为对目标函数进行优化，具有收敛速度快，鲁棒性强等优点，但海鸥优化算法容易出现早熟的问题<sup>[15]</sup>。混沌优化算法可以对系统中混沌变量的不同特点进行搜索，进而跳出早熟找到全局最优解<sup>[16]</sup>。本章结合混沌优化算法与海鸥优化算法，提出混沌海鸥优化算法（COSOA），将其应用于含有光伏发电系统的负荷模型参数辨识实例，分析需要辨识的参数，以拟合误差和平均最优位置为指标，与单一海鸥优化算法和粒子群优化算法进行比较，证明该算法的可行性。

### 3.2 混沌海鸥优化算法

#### 3.2.1 混沌优化算法

采用 Logistic 映射的混沌优化算法，其步骤如下：

(1) 令  $k=0$ ，将决策变量  $x_j^k$ ， $j = 0, 1, 2, \dots, n$  按下式映射为  $0 \sim 1$  之间的混沌变量  $s_j^k$ ：

$$S_j^{k+1} = \frac{x_j^k - x_{\min.j}}{x_{\max.j} - x_{\min.j}} \quad (3-1)$$

(2) 计算下次迭代的混沌变量：

$$S_j^{k+1} = 4S_j^k \times (1 - S_j^k) \quad (3-2)$$

(3) 将混沌变量  $s_j^{k+1}$  转换为决策变量  $x_j^{k+1}$ ：

$$x_j^{k+1} = x_{\min.j} + S_j^{k+1} \times (x_{\max.j} - x_{\min.j}) \quad (3-3)$$

(4) 根据决策变量对新解进行评价。

### 3.2.2 海鸥优化算法

海鸥优化算法是 2019 年由 Gaurav Dhiman 提出的新一代智能算法，算法通过模拟自然界海鸥的迁移和攻击行为，来实现目标函数的优化。海鸥优化算法的主要描述如下：

#### (1) 迁徙行为

在迁徙过程中，海鸥成群结队地飞行，海鸥的初始位置是不同的，可以避免相互碰撞。在一个群体中，海鸥可以朝着最佳海鸥的方向前进，也就是说，这只海鸥的适应值比其他海鸥低。最后基于最佳海鸥的飞行，其他海鸥可以更新它们的初始位置。在这个阶段，应该满足三个条件：

1) 避免碰撞：为了避免与邻居(其他海鸥)碰撞，算法采用附加变量  $A$  计算海鸥的新位置：

$$C_s = A \times P_s(x) \quad (3-4)$$

式中： $C_s$ ——不与其他海鸥位置冲突的新位置；

$P_s$ ——海鸥当前的位置， $x$ 表示当前的迭代次数；

$A$ ——海鸥在给定搜索空间的移动行为。

$$A = f_c - (x * \frac{f_c}{Max_{iteration}}) \quad (3-5)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, Max_{iteration}, \quad (3-6)$$

式中： $f_c$ ——常数，一般取 2；

$Max_{iteration}$ ——最大迭代次数。

2) 最佳位置方向：在避免海鸥之间的碰撞之后，海鸥朝着最佳海鸥所在位置的方向进行移动。

$$M_s = B \times (P_{bs}(x) - P_s(x)) \quad (3-7)$$

式中： $M_s$ ——最佳海鸥的方向；

$P_{bs}$ ——最佳海鸥的位置；

$B$ ——随机数。

$$B = 2 \times A^2 \times rd \quad (3-8)$$

式中： $rd$ ——位于[0,1]之间的随机数。

3) 靠近最佳位置：海鸥可以根据最佳海鸥所在位置的方向，到达新的位置。

$$D_s = |C_s + M_s| \quad (3-9)$$

式中： $D_s$ ——海鸥的新位置

#### (2) 攻击行为



海鸥可以在攻击时做出螺旋自然形状的运动。海鸥利用迁徙过程的历史和经验进行攻击，在迁徙过程中可以不断改变攻角和速度。它们用翅膀和重量保持高度，攻击猎物时，螺旋运动行为发生在空中。 $x$ 、 $y$  和  $z$  平面中的这种行为描述如下。

$$\begin{cases} x' = r \times \cos(k) \\ y' = r \times \sin(k) \\ z' = r \times k \\ r = u \times e^{kv} \end{cases} \quad (3-10)$$

式中： $r$ ——每个螺旋的半径；

$k$ ——位于 $[0, 2\pi]$ 的随机数；

$u$ 和 $kv$ ——螺旋形状的常数。

用公式(3-11)更新海鸥的位置，保存最佳位置 $P_s$ ，更新其他海鸥的位置。

$$P_s = (D_s \times x' \times y' \times z') + P_{bs}(x) \quad (3-11)$$

### 3.2.3 混沌搜索空间和变异概率调整

混沌搜索在小范围空间中的寻优效果比较显著，但在搜索空间较大时耗时长，影响算法效率。本文根据算法的进度自适应调整混沌搜索空间：

$$\begin{cases} x_{\min}(d) = x_{best}(d) - |x_{best}(d)| \times \alpha \\ x_{\max}(d) = x_{best}(d) + |x_{best}(d)| \times \alpha \end{cases} \quad (3-12)$$

式中： $x_{\min}(d)$ ——海鸥中个体的第  $d$  维的搜索下界；

$x_{\max}(d)$ ——海鸥中个体的第  $d$  维的搜索上界；

$x_{best}(d)$ ——海鸥中具有最佳适应度的个体的第  $d$  维；

$\alpha$ ——混沌搜索因子，用于搜索空间的自适应调整。

在算法搜索前期引入混沌变异会降低收敛速度，本文采用混沌变异概率自适应调整的方法，在算法前期降低变异概率，在算法后期增大变异概率，如式（3-13）所示。

$$p_t = 1 - \frac{1}{1 + \lg t} \quad (3-13)$$

式中： $p_t$ ——第  $t$  代的混沌变异概率，利用对数函数的特性实现变异概率的逐渐增大，提高算法的运行效率。

### 3.3 含光伏发电系统的综合负荷模型需要辨识的参数

通过第二章的分析，含光伏发电系统的综合负荷模型需要辨识的参数如下表所示：

表 3-1 需要辨识的模型参数

所属部分	参数名称	参数符号
配网阻抗	配网等值电阻	$R_D$
	配网等值电抗	$X_D$
静态负荷构成	恒电流负荷有功占比	$I_p$
	恒功率负荷有功占比	$P_p$
	恒电流负荷无功占比	$I_q$
	恒功率负荷无功占比	$p_q$
感应电动机模型	马达惯性时间常数	$T_j$
	马达占比	$P_{per}$
	马达负载率	$K_L$
	定子电阻	$R_s$
	定子电抗	$X_s$
	激磁电抗	$X_m$
	转子电阻	$R_r$
	转子电抗	$X_r$
	转矩方程常数	$A$
		$B$
光伏发电模型	光伏阵列短路电流	$I_{sc}$
	光伏阵列开路电压	$U_{oc}$
	光伏阵列最大功率点电流	$I_{mm}$
	光伏阵列最大功率点电压	$U_{mm}$
	直流侧电容	$C$
	直流电压 PI 控制系数	$K_{PUDC}$
	直流电压 PI 控制时间系数	$K_{IUDC}$
	交流电压 PI 控制系数	$K_{PVC}$
	交流电压 PI 控制时间系数	$K_{Iiv}$

由上表可知，对于含有分布式光伏的综合负荷模型，配网阻抗部分有 2 个参数需要辨识，静态负荷构成部分有 4 个参数需要辨识，感应电动机模型部分有 10 个参数需要辨识，光伏发电模型有 9 个参数需要辨识，总共有 25 个参数需要辨识，若同时辨识所有的参数，空间维数较大，进而增加计算的难度和辨识时间，导致

辨识的精度变低。故需分析需要辨识的重要参数，而对于次要参数则通过统计综合法来确定。

#### (1) 感应电动机模型

对于动感应电动机模型，从文献[41]可以得出，感应电动机负荷模型需要重点辨识的参数包括马达占比  $P_{per}$ 、马达负载率  $K_L$ 、定子电抗  $X_S$ 、马达惯性时间常数  $T_j$  这 4 个参数。

#### (2) 静态负荷构成

对于静态负荷来说，通常有功负荷的占比和无功负荷的占比相等，故只需要辨识有功负荷占比即可，则静态负荷需要重点辨识的参数为恒电流负荷占比系数  $I_p$ 、恒功率负荷占比系数  $P_p$ 。

#### (3) 配网等值阻抗

对于配网等值阻抗，通常取配网等值电阻  $R_D = \frac{1}{15} X_D$ ，所以配网等值阻抗只需要辨识  $X_D$  这一个参数。

#### (4) 光伏发电系统

对于光伏发电系统模型，光伏阵列的光伏阵列短路电流  $I_{sc}$ 、光伏阵列开路电压  $U_{oc}$ 、光伏阵列最大功率点电流  $I_m$  和光伏阵列最大功率点电压  $U_m$  4 个参数可直接采用厂家提供参数，不必进行参数辨识，从而减少了参数辨识的维度，节省了辨识的时间。

通过上述分析，得出光伏发电模型需要辨识的参数为直流侧电容  $C$ 、直流电压 PI 控制系数  $K_{PUDC}$ 、直流电压 PI 控制时间系数  $K_{IUDC}$ 、交流电压 PI 控制系数  $K_{PV}$ 、交流电压 PI 控制时间系数  $K_{IV}$  这 5 个参数。

### 3.4 基于混沌海鸥算法的负荷模型参数辨识

本文使用混沌与海鸥优化算法相结合的算法进行含光伏发电系统的负荷模型参数辨识，由上一节得到光伏模型需要辨识的参数为 5 个，SLM 模型需要辨识的重点参数为 7 个，则一共需要辨识 12 个重点参数，其基本步骤如下：

(1) 初始化参数，设置迭代次数，在  $n$  维空间里，随机生成  $m$  个  $n$  维的随机数作为海鸥的初始位置，

(2) 适应值计算。计算出每个海鸥当前的适应值，适应值函数采用有功功率与无功功率的均方差，如下所示：

$$J = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(P_i - P_j)^2 + (Q_i - Q_j)^2}{n}} \quad (3-14)$$

与个体历史最优解对应的适应值进行比较，若当前的适应值优于个体历史最优解对应的适应值，则把当前解替换为个体最优解  $pBest_i$ ，否则不替换。通过比较所有粒子最优的适应值来确定当前种群的最优解  $gBest$

(3) 为了防止算法陷入局部最优解，采用式 (3-1) 到式 (3-3) 所示的混沌算法在  $gBest$  邻域进行最优解的寻优，如果存在，则用新的解来替换  $gBest$ ，否则继续进行下一步计算。

(4) 在个体最优解  $pBest_i$  和当前种群的最优解  $gBest$  的条件下，根据式 (3-4) 至式 (3-11) 更新每个海鸥的位置

(5) 在海鸥群中选取子代中适应度最高的个体，通过混沌变异概率得到的混沌序列进行搜索，以式 (3-15) 将混沌变量序列还原：

$$P_{gi}^{(m)} = X_{\min}(i) + [X_{\max}(i) - X_{\min}(i)] \times Z_i^{(m)} \quad (3-15)$$

将新个体与原个体的适应度进行比较，选择较优的个体保留。

(6) 判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数。若不是，迭代次数增 1 并转到步骤 (2)；若是，按照评价函数值由小到大排序，排在最前列的海鸥即为全局最优解，输出最优解。

### 3.5 算例分析

本文将 COSOA 的算法应用于解决含光伏发电系统的配网负荷模型的优化问题上，在 PSD-BPA 平台上搭建输/配电网仿真系统，其中输电系统为单机无穷大系统，如图 3-1 所示。

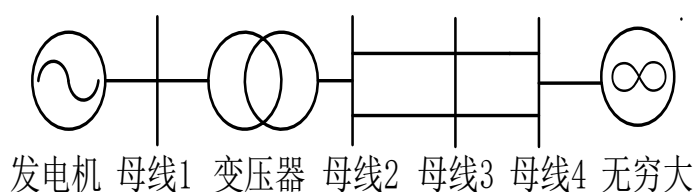


图 3-1 单机无穷大系统

在单机无穷大系统的中点（母线 3）接入某 110kV 配电网系统，110kV 配电网经变压器升压接入输电网，如图 3-2 所示。需要说明的是，光伏发电系统的功率会随光照和温度的变化而改变，但光照和温度的改变的时间尺度一般约为 5 min，所以在研究机电暂态过程时，认为光照和温度保持不变。配电网系统所有母线上的光伏电站及逆变器的参数均相同。

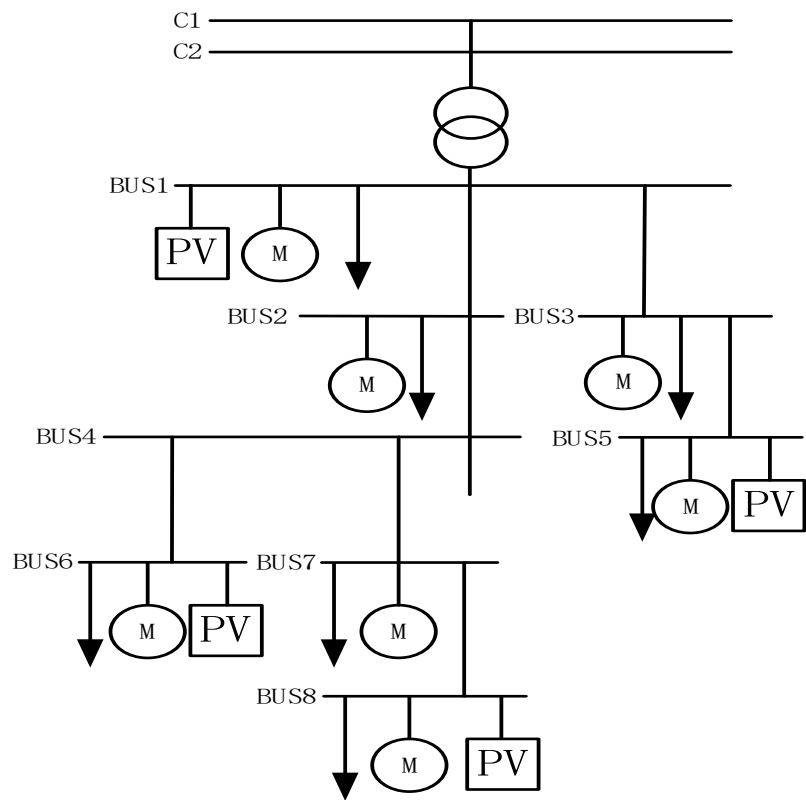


图 3-2 某 110KV 配电网结构

将配电网等值至变压器低压侧 BUS1 母线，在  $t=0.2s$  时，线路母线 2-母线 3 发  
生三相接地故障，经过 0.12S 后将故障切除，测得流经线路 C1-C2 的有功功率曲线  
和无功功率曲线，其结果如图 3-3、图 3-4 所示：

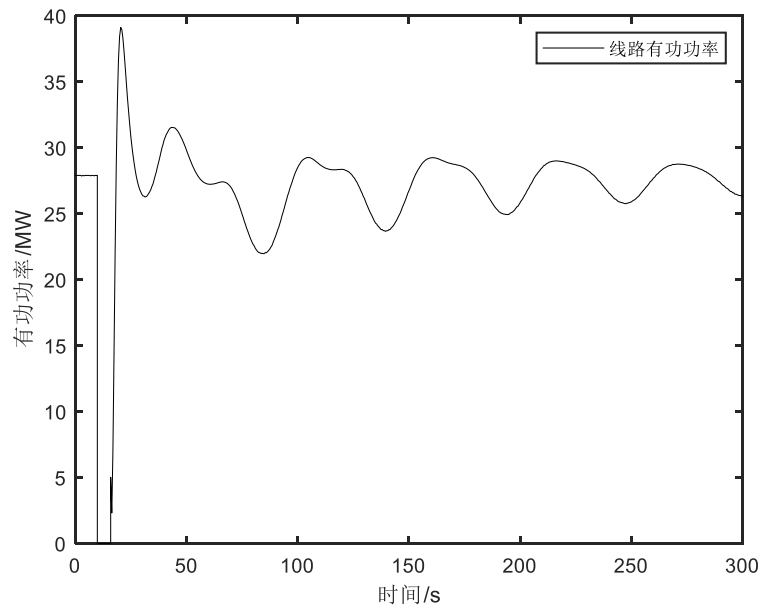


图 3-3 线路有功功率曲线

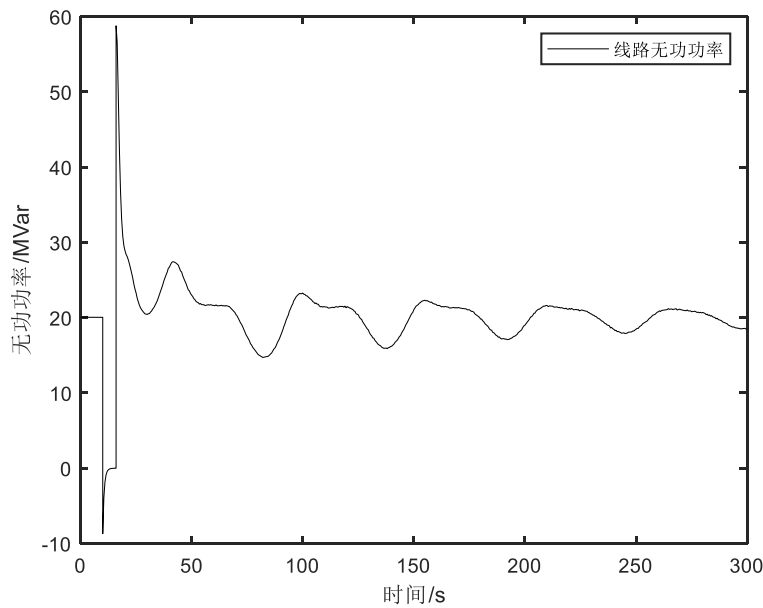


图 3-4 线路无功功率曲线

如上文所述，使用统计综合法来确定次要参数，而对于重要参数使用本文所提及的 COSOA 算法进行参数辨识。对于 SLM 模型的次要参数，参考中国电科院和 IEEE 所给出的推荐值，如表 3-2 所示：

表 3-2 动态负荷及并网逆变器参数典型值

$R_s/pu$	$X_m/pu$	$R_r/pu$	$X_r/pu$	A	B
0.02	3.499	0.02	0.12	0.85	0

对剩余的 12 个参数进行参数辨识，参数搜索范围的选取对辨识结果具有较大的影响，范围太小有可能将真值排除在外，而搜索范围过大又会影响搜索的速度和精度。考虑到参数的合理性，参考国内外负荷参数的典型值，并结合电力负荷建模经验，参数的搜索范围如表 3-3 所示：

表 3-3 动态负荷及并网逆变器参数典型值

参数符号	上限	下限	参数符号	上限	下限
$P_{per}/\%$	80	0	$I_P/\%$	100	0
$K_L/pu$	0.8	0.3	$P_p/\%$	100	0
$X_s/pu$	1.05	0.05	$K_{PUDC}$	10	2
$T_j/pu$	3.5	1.5	$K_{IUDC}$	20	0
$X_D/pu$	0.15	0.05	$K_{PV}$	10	1
$C/mF$	110	0	$K_{IV}$	150	50

使用 COSOA 算法进行参数辨识，拟合前后 C1 至 C2 线路的有功功率及无功功率的暂态响应对比如图 3-5、图 3-6 所示，参数辨识结果如表 3-4 所示：

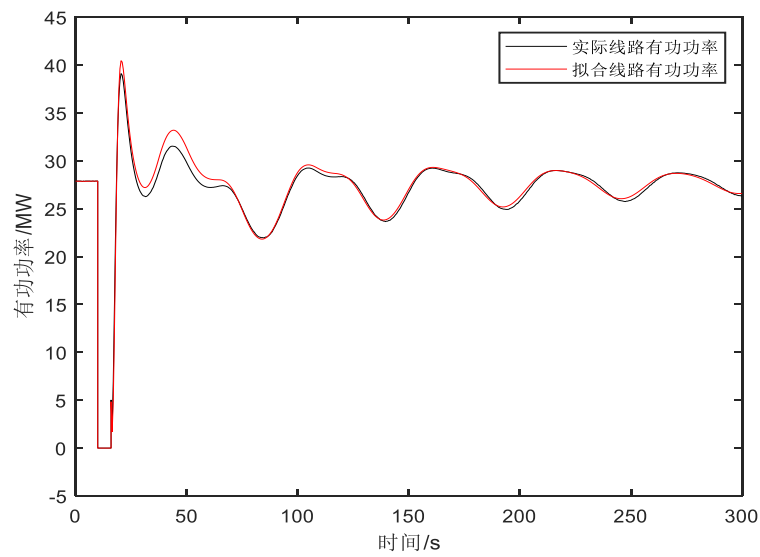


图 3-5 有功功率拟合曲线

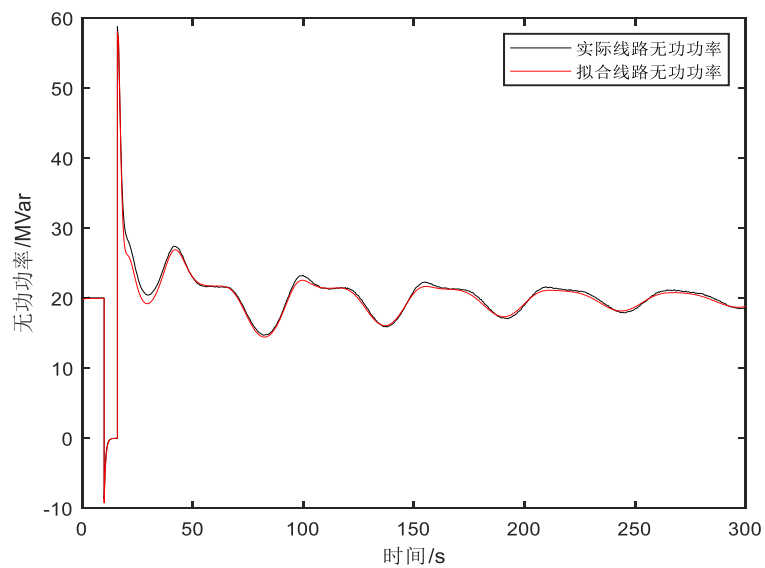


图 3-6 无功功率拟合曲线

表 3-4 参数辨识结果

参数符号	辨识结果	参数符号	辨识结果
$P_{per}$	55%	$I_P$	0.29
$K_L$	58%	$P_p$	0.36
$X_S$	0.075	$K_{PU DC}$	6.27
$T_j$	1.87	$K_{IU DC}$	17.57
$X_D$	0.12	$K_{PV}$	8
$C$	21.46	$K_{IV}$	120

选择经典 PSO 算法和 SOA 算法与所提算法进行比较，取粒子数为 20，迭代次数为 50，分别采用 3 种算法对算例进行参数辨识。3 种算法的拟合误差对比如表 3-5 所示。

表 3-5 三种算法的拟合误差

算法	误差
COSOA	0.024
PSO	0.038
SOA	0.049

平均最优位置反映了全局最优值在迭代过程中的平均变化规律，可以作为衡量算法优劣的标准，表达式如式(3-16)所示，三种算法的平均最优位置变化如图 3-7 所示。

$$aBest = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N gBest_i \quad (3-16)$$

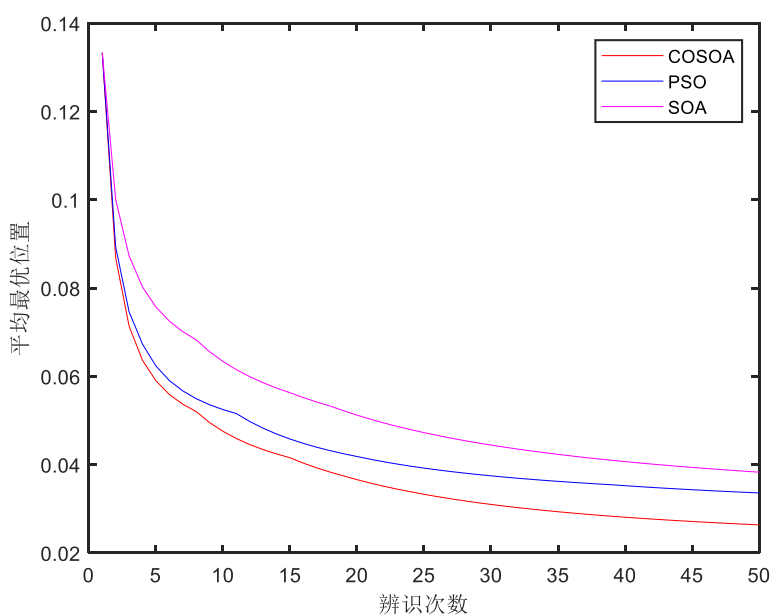


图 3-7 三种算法平均位置

对比分析可以得出，COSOA 相比于 PSO 算法和 SOA 算法，在计算精度和收敛速度等方面具有优越性，适用于负荷模型的参数优化。

### 3.6 本章小结

本章首先介绍海鸥优化算法（SOA）和混沌优化算法（COA），然后结合 SOA 算法与 COA 算法，提出一种适用于负荷模型参数辨识的混沌海鸥混合算法



(COSOA)。将其应用于含有光伏发电系统的负荷模型参数辨识实例，分析需要辨识的重要参数，次要参数则通过统计综合法来确定。最后以拟合误差和平均最优位置为指标，与 PSO 算法和 SOA 算法进行比较，结果表明相比于 SOA 算法和 PSO 算法，COSOA 算法在收敛速度以及模型曲线拟合误差方面有明显的优势，可以用来优化负荷模型参数。

## 第4章 负荷模型对电压稳定性的影响

### 4.1 引言

相对于电力系统其他的定量计算，电压稳定计算对负荷的依赖性更强。凡是提到电力系统电压稳定的影响因素和电力系统动态仿真的元件模型时，不可忽略的就是负荷特性和负荷模型。鉴于此，本章研究负荷模型参数对系统电压稳定性的影响，通过单机-负荷系统分析负荷模型参数对系统电压稳定的影响，分析电压失稳机理，最后以 2024 年网架下的南疆电网受电极限为指标进行模型参数灵敏度分析。需要说明的是，本章不考虑负荷端有关低电压条件下的各种负荷的保护措施。

### 4.2 单机-负荷算例

#### 4.2.1 单机-负荷系统

为了研究负荷模型参数对暂态电压稳定的影响，在 PSD-BPA 平台搭建单机-负荷系统，这一类系统可以反映受端系统在故障后的电压恢复特性，也便于比较受端采用不同负荷模型时结果的差异，单机-负荷系统如图 4-1 所示。其中无穷大电源 G1 通过升压变压器与 BUS1 相连，BUS1 通过双回线路与 BUS2 相连，负荷接在 BUS2 上，负荷模型的参数如表 4-1、表 4-2、表 4-3 所示：

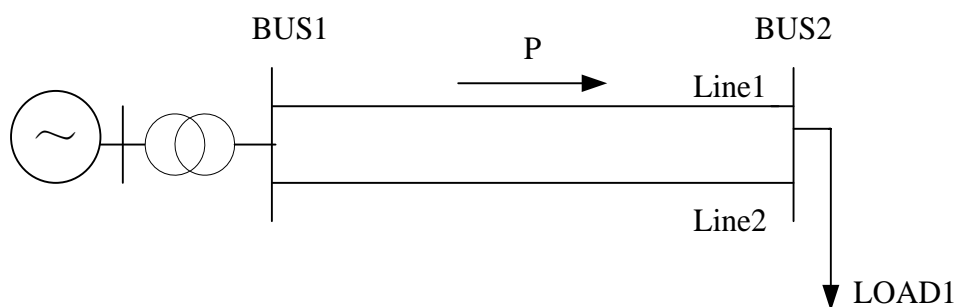


图 4-1 单机-负荷系统

故障设置如下：在  $t=0s$  时，仿真系统 BUS1-BUS2 线路（近母线 BUS2 侧）发生三相接地故障，经过  $t=0.1s$  后将故障切除，通过判断故障后 BUS2 的电压情况及故障后负荷吸收的无功功率来分析负荷模型参数对暂态电压稳定性的影响。

表 4-1 动态负荷模型参数

马达参数	数值
马达占比 $P_{per}$	60
负载率 $K_L$	60
惯性时间常数 $T_j$	2
定子电阻 $R_s$	0.02
定子电抗 $X_s$	0.18
励磁电抗 $X_m$	3.5
转子电阻 $R_r$	0.02
转子电抗 $X_r$	0.12
转矩方程系数 A	1
转矩方程系数 B	0

表 4-2 配电网等值阻抗参数

配网阻抗	数值
配电网支路电阻 $R_D$	0.001
配电网支路电抗 $X_D$	0.015

表 4-3 静态负荷模型参数

静态负荷参数	数值
恒定阻抗有功负荷占比 $Z_p$	100%
恒定电流有功负荷占比 $I_p$	—
恒定功率有功负荷占比 $P_p$	—
恒定阻抗无功负荷占比 $Z_q$	100%
恒定电流无功负荷占比 $I_q$	—
恒定功率无功负荷占比 $P_q$	—

通过上一章的分析，得出负荷模型参数对于系统的动态特性影响较大的参数为马达占比  $P_{per}$ 、负载率  $K_L$ 、定子电阻  $R_s$  惯性时间常数  $T_j$ 、静态负荷构成和配网等值阻抗，下面分别分析这些参数对系统暂态电压稳定性的影响。

#### 4.2.2 负荷模型参数的影响

##### (1) 马达占比的影响

负荷模型其他参数保持不变，分别取马达占比为 40%、60%和 80%，观察 BUS2 的电压和马达吸收的无功功率如图 4-2 所示：

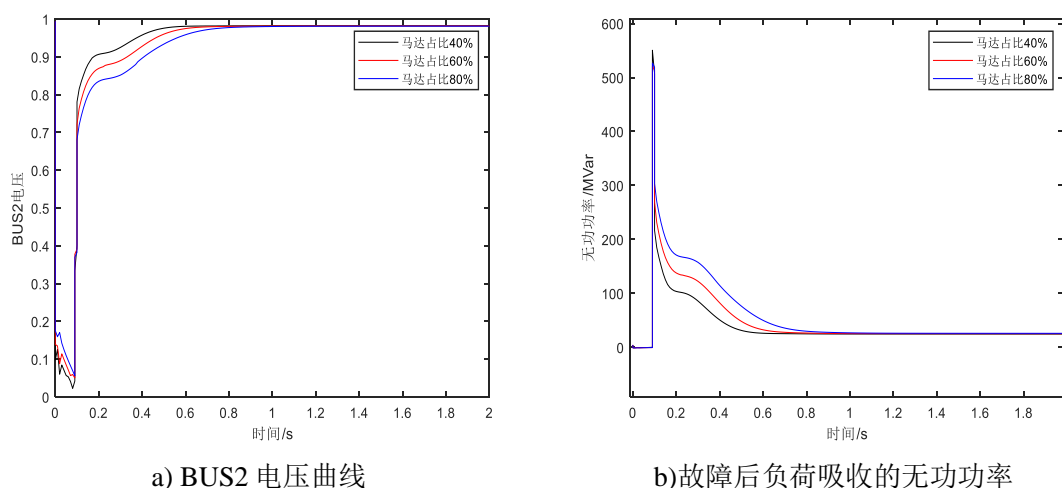


图 4-2 不同马达占比下 BUS2 电压及负荷吸收无功功率

故障期间马达吸收的无功功率为零，母线电压跌落至较低值，故障消失瞬间，马达吸收较大的无功功率，电压开始恢复，在电压恢复至稳定值期间，马达吸收的无功功率由故障消失瞬间的较大值逐渐衰减至零。随着马达占比的提高，故障后马达吸收的无功功率增大，且衰减速度变慢，衰减过程中吸收的无功功率增大，同时母线电压恢复至稳定值的时间增多，系统暂态电压稳定性降低。

## (2) 马达负载率的影响

荷模型其他参数不变，分别取马达负载率为 40%、60%和 80%，观察 BUS2 的电压和马达吸收的无功功率如图 4-3 所示：

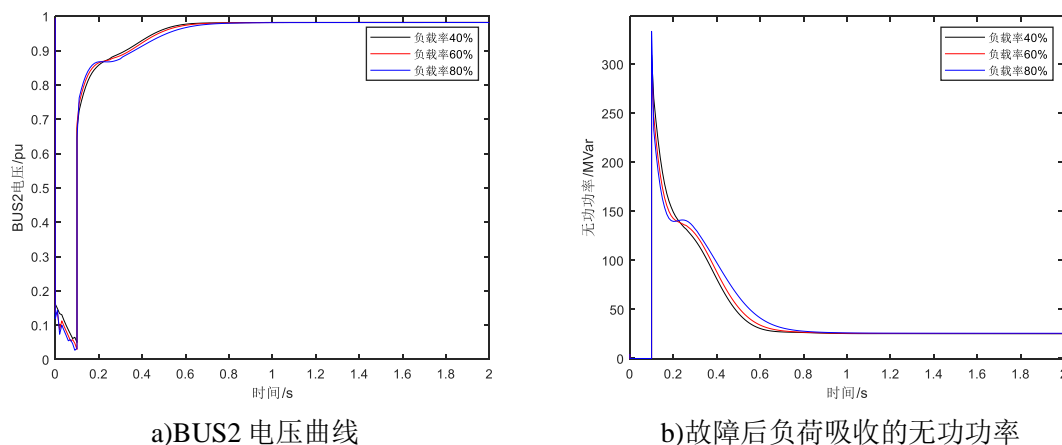
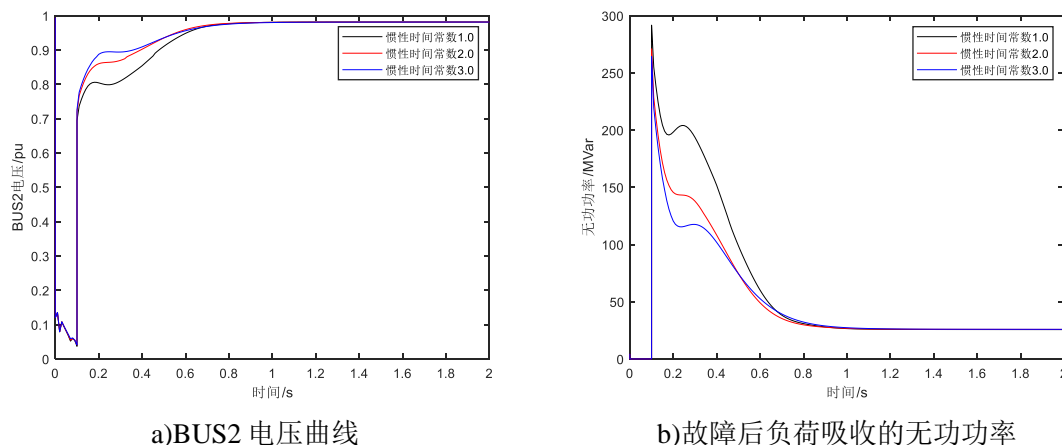


图 4-3 不同负载率下 BUS2 电压曲线及负荷吸收无功功率

由上图可以看出，随着马达负载率的上升，故障瞬间母线电压的跌落增大，母线电压恢复的时间增长，且母线电压恢复过程中的平均电压减小，降低了暂态电压稳定性；由图(b)马达无功特性的曲线中可以看出，随着马达负载率的增加，故障切除瞬间马达吸收的无功增多，与母线电压跌落程度相对应，无功功率衰减过程中的平均值增大，因此马达占比的提高会降低系统的暂态电压稳定性。

### (3) 马达惯性时间常数的影响

负荷模型其他参数不变，分别取马达惯性时间常数为 1.0、2.0 和 3.0，观察不同惯性时间常数下 BUS2 的电压和马达吸收的无功功率如图 4-4 所示：



a)BUS2 电压曲线

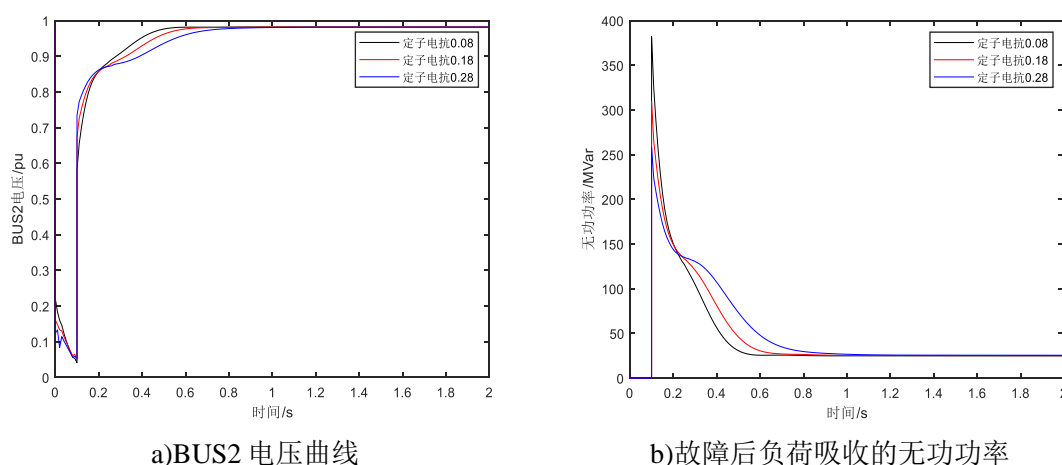
b)故障后负荷吸收的无功功率

图 4-4 不同惯性时间常数下 BUS2 电压曲线及负荷吸收无功功率

由上图可以得知，随着惯性时间常数的增大，故障消失瞬间马达吸收的无功功率初始值变小，衰减过程中吸收的无功功率变小，衰减时间变小；对应于 BUS2 电压恢复过程中的初始值变大，恢复过程中的平均电压变大，恢复时间变小，因此惯性时间常数的增加会提高系统暂态电压稳定性。

### (4) 马达定子电抗的影响

负荷模型其他参数不变，分别取马达定子电抗为 0.08、0.18 和 0.28，观察 BUS2 的电压和马达吸收的无功功率如图 4-5 所示：



a)BUS2 电压曲线

b)故障后负荷吸收的无功功率

图 4-5 不同马达定子电抗下 BUS2 电压曲线及负荷吸收无功功率

由上图可以得知，随着定子电抗的增大，故障消失瞬间马达吸收的无功功率变小，但衰减过程中负荷吸收的无功功率变大，且衰减时间变大，对应于 BUS2 电压恢复过程初始值变大，但母线电压恢复过程中的平均电压变低，恢复时间变大，因此定子电抗的增加会降低系统的暂态电压稳定性。

### (5) 配网等值阻抗的影响

负荷模型其他参数不变，分别配网等值电抗为 0.015、0.045、0.075，等值阻抗  $R_d = (1/15) X_d$ ，观察 BUS2 的电压和马达吸收的无功功率如图 4-6 所示：

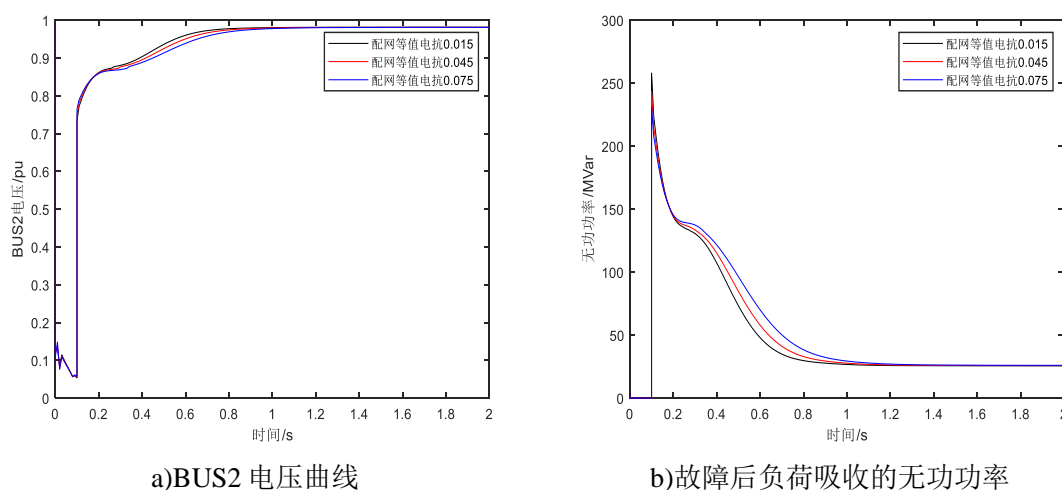


图 4-6 不同配网阻抗下 BUS2 电压曲线及负荷吸收无功功率

由上图可以得知，随着配网阻抗的增大，故障消失瞬间马达吸收的无功功率初始值变小，但衰减过程中吸收的无功功率变大，且衰减时间变大；对应于 BUS2 电压恢复过程中的初始值变大，但恢复过程中的平均电压变小，恢复时间增多，因此配网阻抗的增加会降低系统的暂态电压稳定性。

### (6) 静态负荷构成的影响

负荷模型其他参数保持不变，静态负荷构成分别取恒阻抗负荷占比 100%、恒电流负荷占比 100%和恒功率负荷占比 100%，静态负荷不同构成下 BUS2 的电压和马达吸收的无功功率如下图所示：

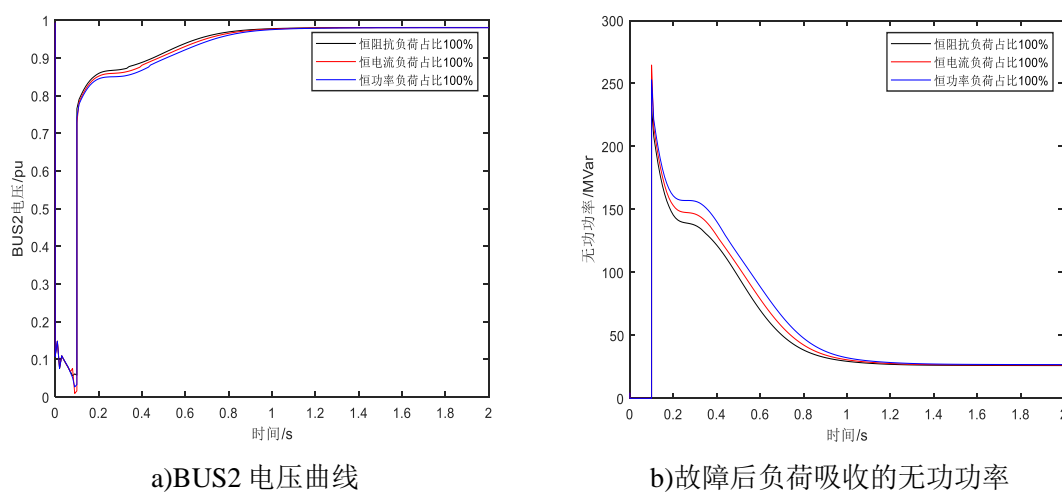


图 4-7 不同静态负荷构成下 BUS2 电压曲线及负荷吸收无功功率

可以看出,静态负荷为恒阻负荷抗占比 100%时,负荷吸收的无功功率衰减过程中吸收的无功功率最小,电压恢复过程中的平均电压最高;静态负荷为功率负荷占比 100%时,负荷吸收的无功功率衰减过程中吸收的无功功率最大,电压恢复过程中的平均电压最低。故静态负荷中恒阻抗负荷最有利于电压稳定,恒功率负荷最不利于电压稳定,恒电流负荷对于电压稳定的影响介于两者之间。

### 4.3 电压失稳机理

正常情况下和电压失稳情况下的感应电动机有功功率、无功功率、滑差及机端电压曲线如图 4-8 所示。

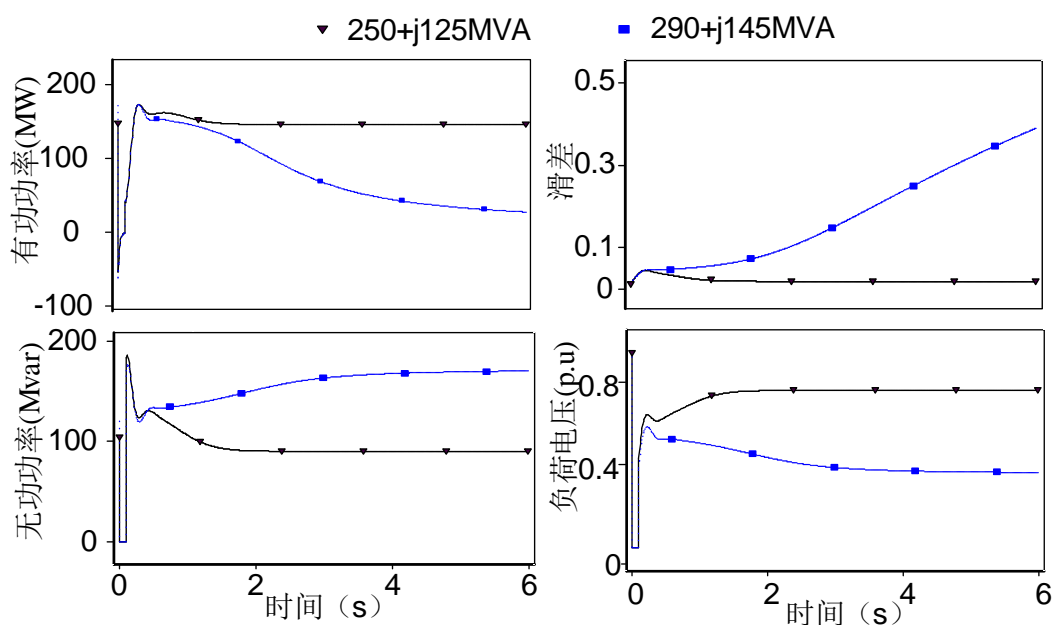


图 4-8 电压失稳感应电动机曲线

马达负荷在故障后将吸收大量的无功,存在一段电压恢复期,经过一定时间后节点电压才恢复至较高水平,且马达比例越高这段电压恢复时间越长,这是因为马达机械惯性的原因,故障后滑差不能随扰动瞬时变化,当滑差保持不变时,电动机仅仅表现为阻抗特性,因此其有功、无功和电磁转矩都在电压下降后减小,电磁转矩的减小导致马达转子减速,滑差增大,随着滑差在短时间内的迅速增大,感应电动机将从系统内吸收大量无功功率(如式(4-1))。如果感应电动机能恢复稳定,滑差减小的同时,吸收无功功率将逐渐减小到稳态前的水平,但如果电压降低较多(低如于 0.4p.u.)导致许多感应电动机难以恢复,感应电动机滑差增大,吸收无功功率增大,引起系统电压的进一步降低,造成受端电网电压崩溃,系统失稳模式表现为电压失稳。

$$\begin{cases} P \approx \frac{2P_{\max}}{\frac{S}{S_{cr}} + \frac{S_{cr}}{S}} \\ Q \approx \frac{2P_{\max}}{1 + \frac{S_{cr}^2}{S^2}} \end{cases} \quad (4-1)$$

式中： $P_{\max}$ ——一定电压水平下感应电动机可吸收的最大有功功率；

$S_{cr}$ ——感应电动机临界滑差；

静态负荷吸收的功率特别是无功功率主要受电压变化的影响。以图 4-1 所示的单机-负荷系统为例，假如负荷为恒功率负荷，系统故障后电压降低，导致线路上电流的增加，使得线路上的电压降落增大，进一步降低了负荷端电压，而端电压的下降引起线路充电功率的减小，使系统中无功更加短缺。与此同时负荷电流的增加会引起发电机的输出电流增大，如果发电机励磁电流已达极限，电枢反应将导致发电机气隙磁通的减少，致使发电机内电势减小，发电机端电压降低，发电机发出的无功功率减小，导致系统各节点电压进一步降低，从而引起电压持续下降直至系统电压崩溃。假如负荷为恒阻抗负荷，其负荷电流随电压的降低正比下降，不仅不会产生上述的恶性循环，还会缓解系统的无功缺额，最有利于电压稳定；而恒电流负荷对系统电压稳定的影响则介于恒功率负荷和恒阻抗负荷之间。

## 4.4 参数灵敏度分析

### 4.4.1 南疆电网网架结构

本节以南疆电网受电极限为指标进行负荷模型参数灵敏度分析，边界条件为冬季小负荷夜间方式，南疆电网的受电能力受电压稳定性制约，因此可以根据南疆电网的受电极限分析参数灵敏度。南疆电网的网架如图 4-9 所示：

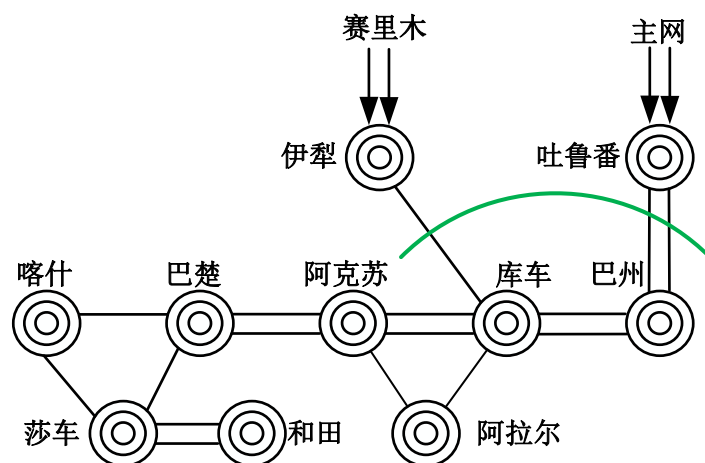


图 4-9 南疆电网网络框架



西北主网通过伊犁-库车+吐鲁番-巴州断面向南疆地区供电，作为典型的受端系统，南疆电网受电极限受电压稳定制约。故以伊犁-库车+吐鲁番-巴州断面受电能力为判据研究负荷模型参数对电压稳定性的影响。

4.4.2 负荷模型参数灵敏度分析

(1) 马达占比的影响

负荷模型其他参数保持不变，分别取马达比例为 55%、60%、65%和 70%，分析不同马达比例对南疆电网受电能力的影响，其极限方式的潮流图如图 4-10 所示：

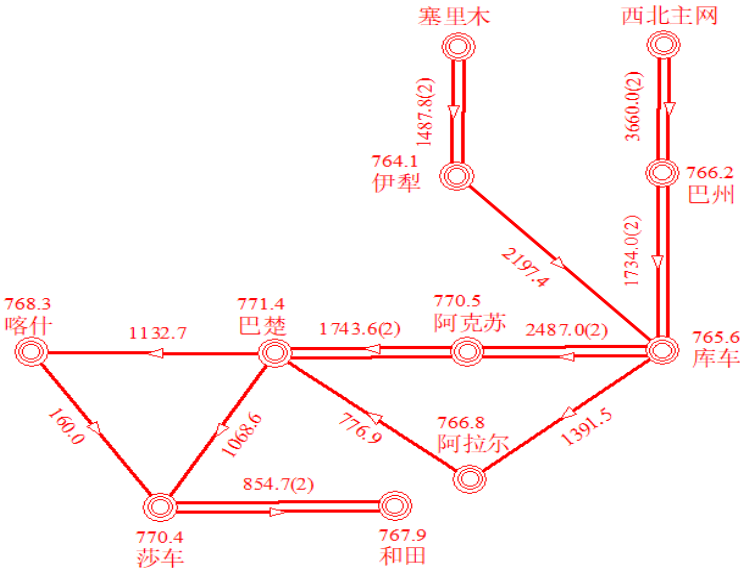


图 4-10 伊库+巴楚断面极限受电潮流图

制约伊库+吐巴断面受电极限的故障为伊犁-库车单回线库车侧 N-1 故障，故障后南疆地区电压过低不能恢复，图 4-11 为伊库线 N-1 后南疆 110kV 母线电压。

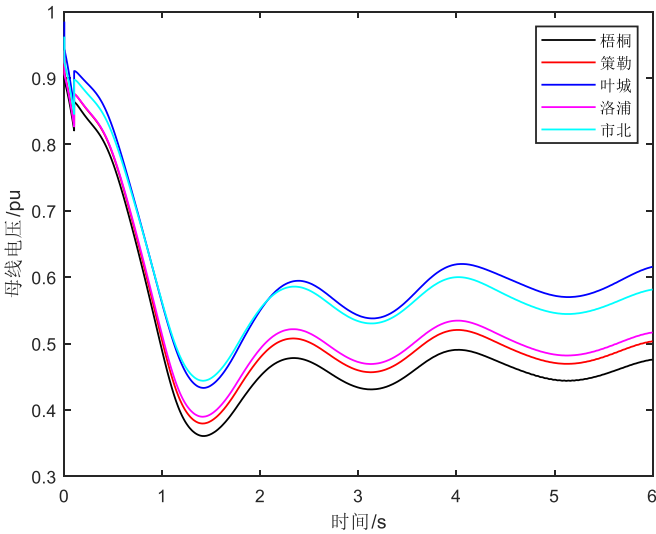


图 4-11 伊库线 N-1 南疆 110kV 母线电压

分别取马达比例为 55%、60%、65%和 70%，得到不同马达比例下的伊库+吐巴断面受电极限如表 4-4 所示，由表可以得出结论，随着马达占比的增大，伊库+吐巴断面受电能力下降，与前文的结论一致。

表 4-4 SLM 模型马达比例对伊库+吐巴断面受电极限的影响

马达比例 (%)	约束故障	受电极限 (MW)	极限增量 (MW)
55%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	4056	64
60%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3931	-
65%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3873	-58
70%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3805	-126

(2) 马达负载率的影响

南疆电网负荷模型其他参数保持不变，马达负载率依次选取 50%、60%、70%、和 80%时，2024 年网架下伊库+吐巴断面的功率受电极限如表 4-5 所示，其中伊库+吐巴断面受电极限的增加量以负载率为 60%为基准。由表可以得出结论，随着马达负载率的增大，伊库+吐巴断面受电能力下降，与前文的结论一致。

表 4-5 SLM 模型马达负载率对伊库+吐巴断面受电极限的影响

马达负载率 (%)	约束故障	送电极限 (MW)	极限增量 (MW)
50%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3961	30
60%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3931	-
70%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3916	-15
80%	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3900	31

(3) 马达惯性时间常数的影响

南疆电网负荷模型其他参数保持不变，马达惯性时间常数依次选取 1.0、1.5、2.0、2.5 和 3.0 时，2024 年网架下伊库+吐巴断面的功率受电极限如表 4-6 所示，伊

库+吐巴断面受电极限的增加量以惯性时间常数为 2.0 为基准。由表可以得出结论，随着马达惯性时间常数的增大，伊库+吐巴断面受电能力提高，与前文的结论一致。

表 4-6 SLM 模型马达惯性时间常数对伊库+吐巴断面受电极限的影响

惯性时间常数	约束故障	受电极限（MW）	极限增量（MW）
1.0	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3899	-32
1.5	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3916	-15
2.0	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3931	-
2.5	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3956	25
3.0	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3969	68

（4）马达定子电抗的影响

南疆电网负荷模型其他参数保持不变，马达定子电抗依次选取 0.1、0.2、0.3、和 0.4 时，2024 年网架下伊库+吐巴断面的功率受电极限如表 4-7 所示，其中伊库+吐巴断面受电极限的增加量以定子电抗为 0.1 为基准。由表可以得出结论，随着马达定子电抗的增大，伊库+吐巴断面受电能力降低，与前文的结论一致。

表 4-7 SLM 模型马达定子电抗对伊库+吐巴断面受电极限的影响

定子电抗（pu）	约束故障	受电极限（MW）	极限增量（MW）
0.1	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3899	-
0.2	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3876	-23
0.3	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3850	-49
0.4	伊库线 N-1 后南疆低电压问题制	3841	-58

（4）配网等值阻抗对的影响

南疆电网负荷型其他参数保持不变，配网等值阻抗依次选取 0.015、0.030、0.045、0.060 和 0.075，其中配网电阻  $R_D = \frac{1}{15} X_D$ ，南疆电网的功率受电极限如表 4-8 所示。伊库+吐巴断面受电极限的增加量以配网等值阻抗 0.015 为基准。由表可以得出结论，随着配网等值阻抗的增大，南疆断网受电能力降低。

表 4-8 SLM 模型配网等值电抗对伊库+吐巴断面受电极限的影响

配网等值电抗 (pu)	约束故障	受电极限 (MW)	极限增量 (MW)
0.015	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3931	-
0.030	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3942	11
0.045	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3962	31
0.060	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3993	61
0.075	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	4014	82

(5) 静态负荷构成的影响

南疆电网负荷型其他参数保持不变，负荷模型的静态负荷构成分别取：1) 100%恒阻抗 (Z) +0%恒电流 (I) +0%恒功率 (P)；2) 50%恒阻抗 (Z) +50%恒电流 (I) +0%恒功率 (P)；3) 50%恒阻抗 (Z) +0%恒电流 (I) +50%恒功率 (P)；得到 2024 年网架下伊库+吐巴断面的功率受电极限如表 4-9 所示。其中伊库+吐巴断面受电极限随静态负荷构成变化的增加量以 100%恒阻抗负荷为基准。

表 4-9 SLM 模型静态负荷构成对伊库+吐巴断面受电极限的影响

静态负荷构成	约束故障	受电极限 (MW)	极限增量 (MW)
100%恒阻抗	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3931	-
50%恒阻抗+ 50%恒电流	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3807	-124
50%恒阻抗+ 50%恒功率	伊库线 N-1 后南疆低 电压问题制	3590	-341

可以看出, SLM 模型静态部分采用 100%恒阻抗时的受电极限为 3931MW, 采用 50%恒阻抗+50%恒电流时的受电极限为 3807MW, 采用 50%恒阻抗+50%恒功率时的受电极限为 3590MW, 可以看出恒阻抗负荷最有利于系统电压稳定性, 恒功率负荷最不利于系统电压稳定性, 恒电流负荷介于两者之间, 与前文分析一致。

## 4.5 本章小结

本章研究负荷模型参数对电压稳定性的影响, 通过单机-负荷算例分析负荷模型参数对系统暂态电压稳定性的影响, 分别得出马达占比、马达负载率、马达惯性时间常数、马达定子电抗、配网等值阻抗和静态负荷构成对系统暂态电压稳定性的影响, 之后对电压失稳的机理进行分析, 表明感应电动机滑差增大导致吸收较多无功, 滑差不能恢复而引起电压失稳。最后以 2024 年网架下的南疆电网受电极限为指标进行参数灵敏度分析, 表明对南疆电网受电极限影响最大的参数为静态负荷构成, 采用 100%恒阻抗时受电极限最高, 而采用 50%恒阻抗+50%恒功率时受电极限最低; 另外马达占比的影响也比较明显, 随着马达占比的增大, 受电极限呈递减趋势。马达负载率、马达惯性时间常数、马达定子电抗、配网等值阻抗对南疆电网受电极限影响相比于负荷静态构成和马达占比较小。

## 第5章 分布式光伏对电压稳定的影响

### 5.1 引言

近年来,在国家政策的支持下,分布式光伏发电大力发展,分布式光伏大多数位于系统的受电端,而受端电网受电能力大部分受电压稳定制约。随着分布式光伏在配电网的接入容量日益增多,配电网的暂态特性呈现与传统不同的特征,分布式光伏的容量及控制策略都会对电力系统的稳定性带来一定的影响。

### 5.2 分布式光伏对电压稳定性的影响分析

为研究分布式光伏控制特性对暂态电压稳定的影响,本章构建含分布式光伏的仿真系统如图 5-1 所示,包括 1 台火电机组( $1\times 300\text{MW}$ )、4 台水电机组( $4\times 25\text{MW}$ )、3 个配电系统,其中每个配电系统带有负荷  $300\text{MW}$ ,含有分布式光伏  $25\text{MW}$ 。仿真验证时,所有机组全部开机,火电及水电均满出力。设定线路 BUS1-BUS2 双回线路 0.5s 发生单回三相永久性故障,0.1s 后切除,截取 0s-12s 曲线进行对比分析。

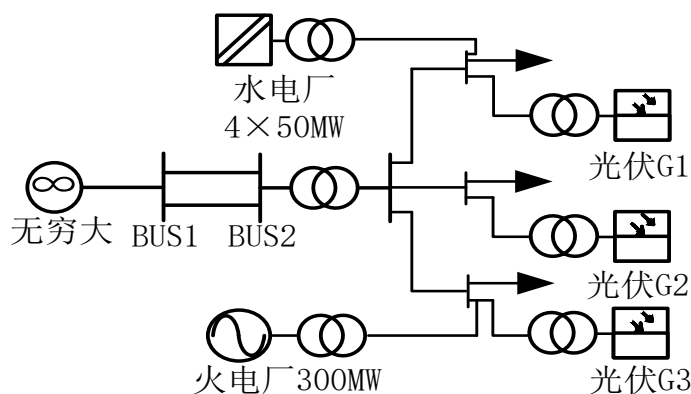


图 5-1 含分布式光伏系统

#### 5.2.1 光伏渗透率对电压稳定性的影响

为了研究光伏接入后对系统暂态电压稳定性的影响,对比以下三种出力场景:①常规电源满发,分布式光伏 0 出力(常规满发无光);②常规电源满发,分布式光伏出力  $50\text{MW}$ (常规满发有光);③电源总出力不变,分布式光伏出力  $50\text{MW}$  替代火电出力(定出力替火电)。三种场景下主变低压侧母线电压和线路输送无功功率曲线如图 5-2 和图 5-3 所示。

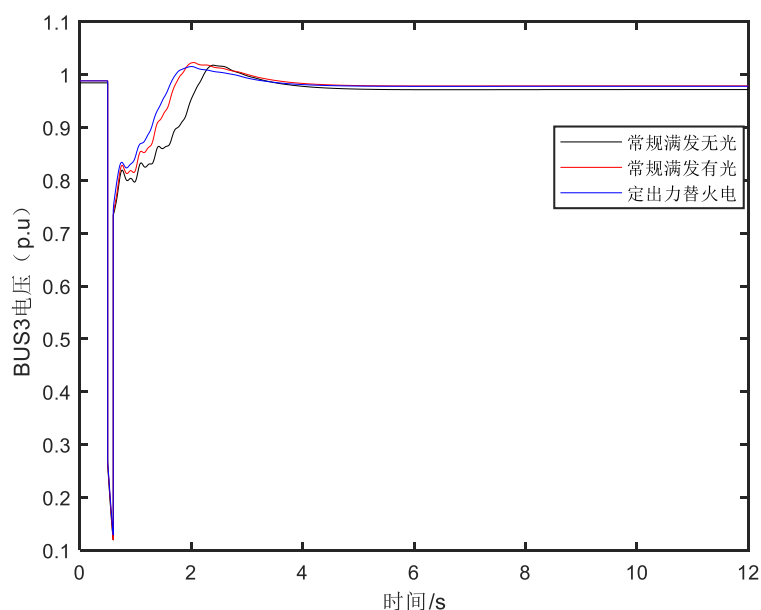


图 5-2 主变低压侧母线电压曲线

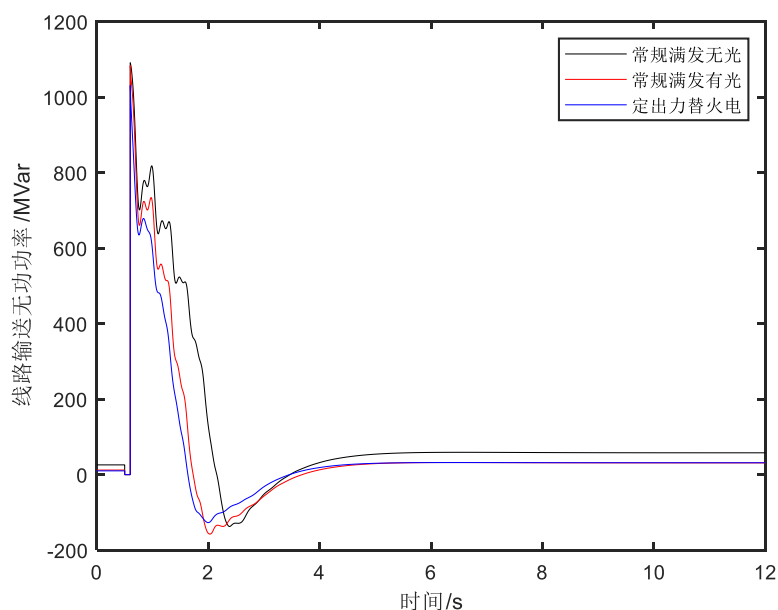


图 5-3 线路 BUS1-BUS2 输送无功功率曲线

通过场景①和场景②、场景③对比可知，故障期间电压跌落相同，但随着分布式光伏容量的增加，母线电压恢复速度增快，且故障后系统传输的无功功率减小，因此提高分布式光伏的渗透率可以提高系统电压稳定性。

单独对比场景②和场景③可知，相比于单一提高光伏渗透率，用分布式光伏代替火电机组，从而使火电机组留有一定的旋转备用更有利于电力系统电压稳定性。

### 5.2.2 系统惯量对电压稳定性的影响

机组开机方式决定系统惯量大小，同时也决定了系统等值电抗的大小，因此惯量对系统暂态稳定性起着关键作用。本节针对光伏出力替代常规电源开机（总出力不变惯量减少）情况进行分析。

保持系统送出力不变，分布式光伏出力 0MW、25MW、50 MW 和 75 MW。分别替代水电开机 0 台、1 台、2 台和 3 台，三种场景下主变低压侧母线电压和线路输送无功功率曲线如图 5-4 和图 5-5 所示。可见，水电关机导致系统惯量减少，虽然总出力不变，但系统暂态电压稳定性逐渐降低。

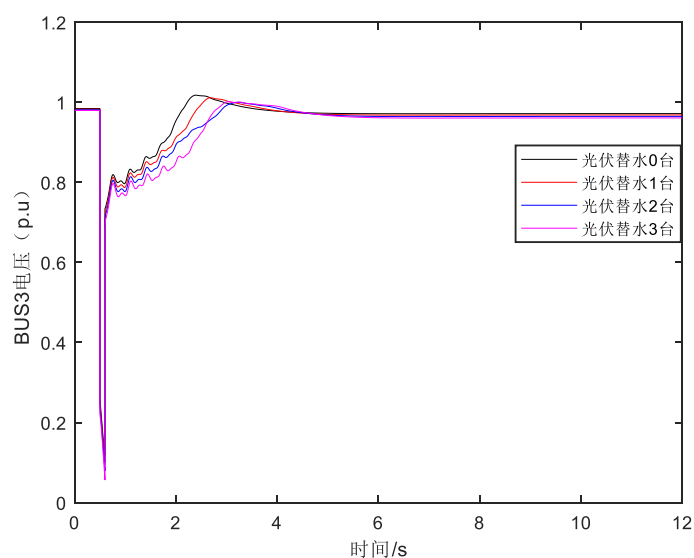


图 5-4 主变低压侧母线电压曲线

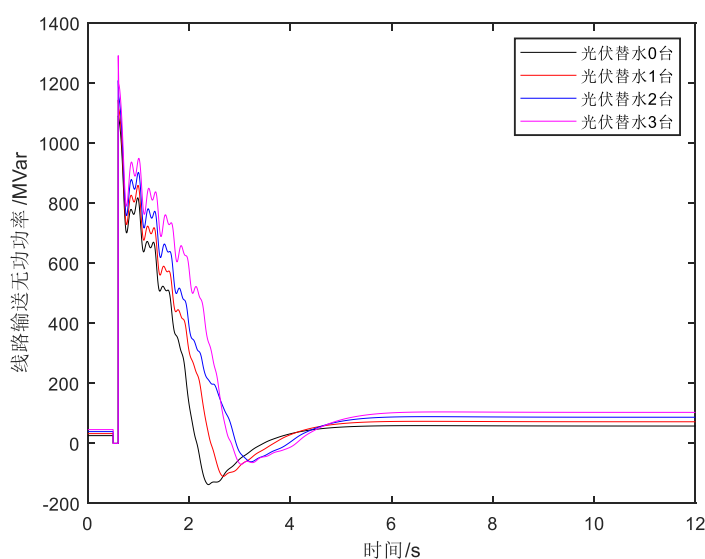


图 5-5 线路 BUS1-BUS2 输送无功功率曲线



### 5.2.3 低穿有功控制策略对电压稳定性的影响

在火电机组满发，水电机组出力  $4 \times 25\text{MW}$ ，分布式光伏出力  $3 \times 25\text{MW}$  边界下，调整光伏故障后不同阶段控制模型，研究其对暂态电压稳定性影响。

#### (1) 低电压穿越期间和结束后的有功控制

此阶段可分为低电压穿越期间有功控制和电压恢复后有功爬升控制，如图 5-6 所示。低穿期间有功控制包括四种：指定有功电流值、指定有功电流占初始电流的百分比、指定有功功率值、指定有功功率站初始功率的百分比。

低电压结束后有功可根据设定初始值、恢复方式、恢复速率逐渐恢复到低电压穿越前数值。爬坡初始值可选择指定有功电流值、指定有功电流占初始电流的百分比、指定有功功率值、指定功率占初始功率的百分比四种方式；爬坡过程可选择为立即恢复、按照指定斜率上升、按照抛物线上升、按照指定时间斜线上升四种方式。

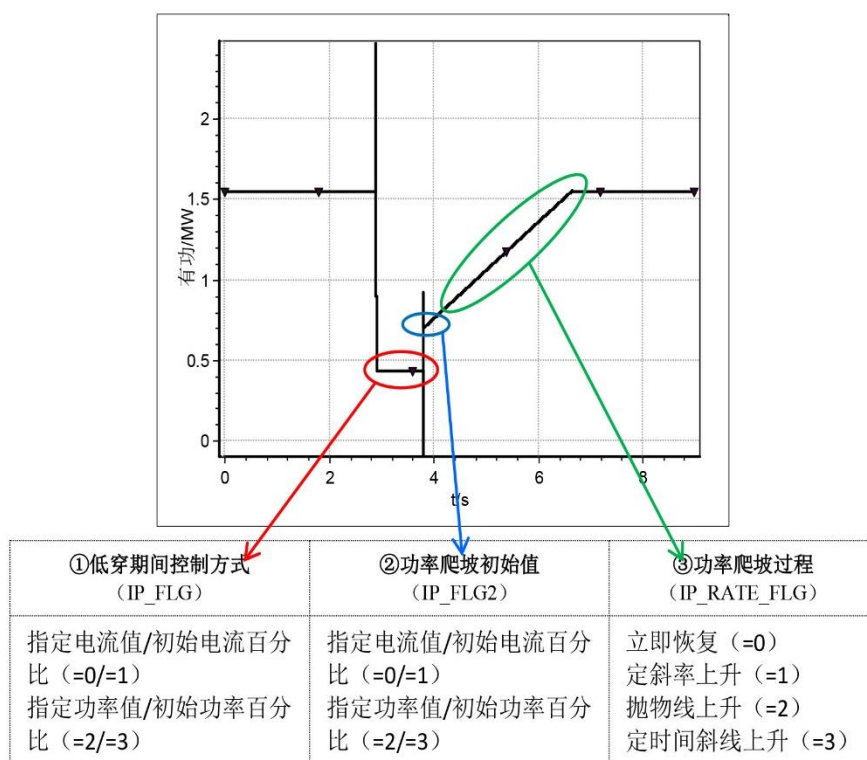


图 5-6 低电压穿越期间和结束后的有功控制

#### (2) 低电压穿期间有功控制方式的影响

在低穿期间，光伏有功控制方式选择指定有功电流占初始电流的百分比，分别按照 0、50%、100%控制。主变低压侧母线电压和线路输送无功功率曲线图 5-7、图 5-8 所示。

对比母线电压和线路无功功率可以得知，光伏低穿期间有功出力越多，电压恢复越快，越利于电压稳定性，

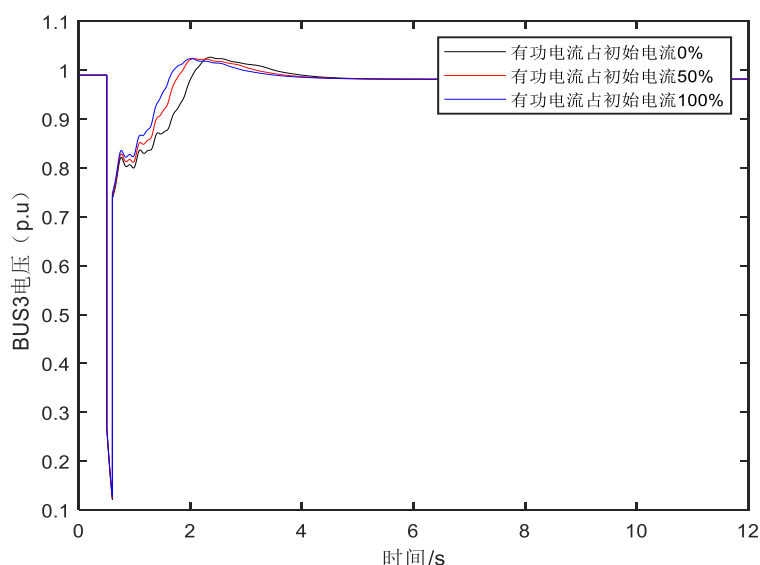


图 5-7 主变低压侧母线电压曲线

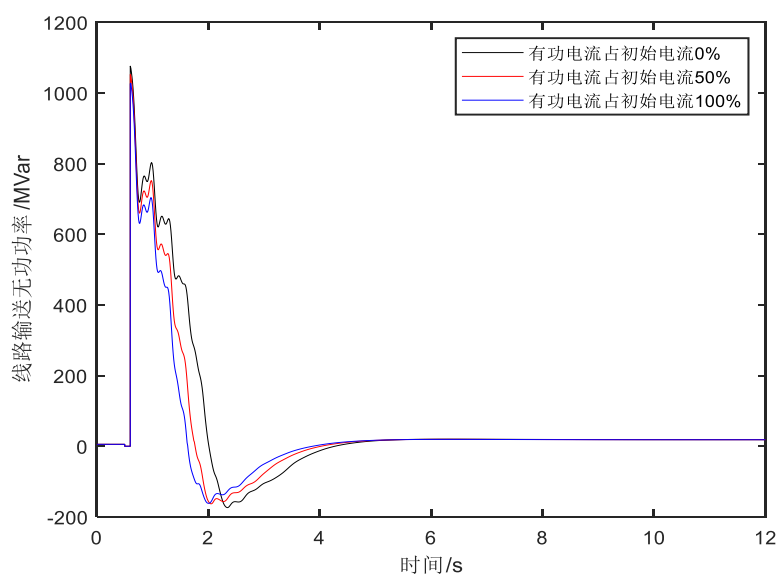


图 5-8 线路 BUS1-BUS2 输送无功功率曲线

### (3) 低电压穿越结束后有功控制方式的影响

低电压穿越结束后，电压恢复至较高值，光伏有功功率逐渐恢复，有功功率恢复的起点和恢复的过程均对系统暂态电压稳定性有不同的影响，下面进行具体分析。

首先是爬升起点的影响。在指定有功电流占初始电流的百分比方式下，设定占比为 0、50%、100%，仿真曲线如图 5-9 所示。因为低电压过程已经结束，所以爬升起点对电压稳定几乎没有影响。

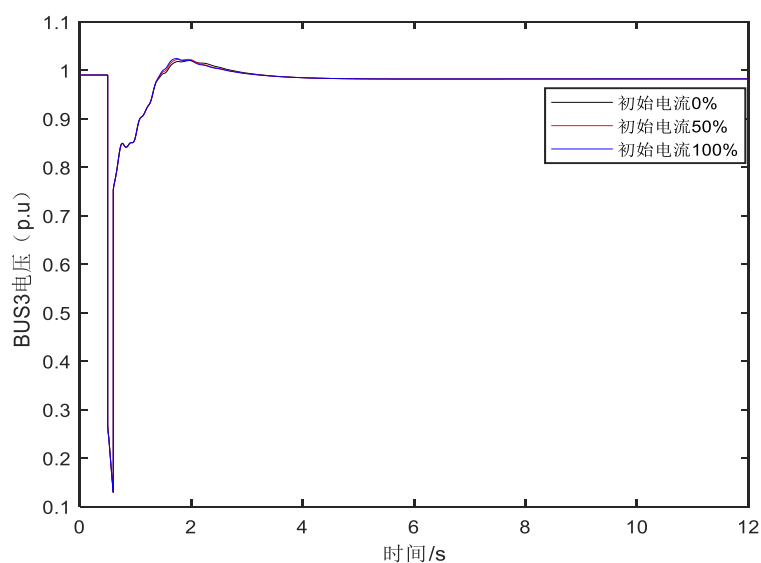


图 5-9 不同爬升起点下的母线电压曲线

然后分析功率爬升曲线的影响。功率爬升方式选择较多，本文选择斜率上升方式，按照斜率 0.2、0.5、1 分别进行仿真，主变低压侧母线电压如图 5-10 所示。

对比分析可知，由于此控制介入在低电压过程结束后，功率爬升方式对电压稳定几乎没有影响。但是随着光伏出力规模的增大，其功率爬升过程可能导致系统频率稳定特性和阻尼的改变，非本文研究内容不再赘述。

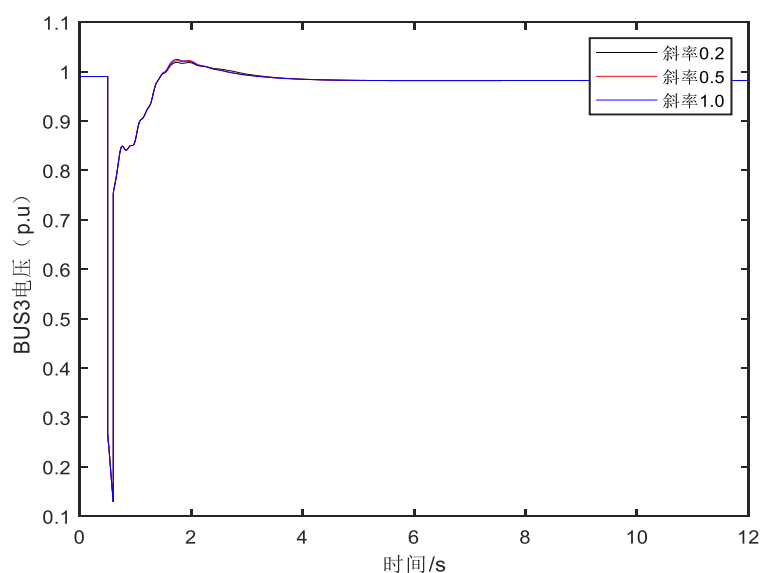


图 5-10 功率爬升设置不同斜率下的母线电压曲线

#### 5.2.4 低穿无功控制策略对电压稳定性的影响

在火电机组满发，水电机组出力  $4 \times 25\text{MW}$ ，分布式光伏出力  $3 \times 25\text{MW}$  边界下，调整光伏故障后不同阶段控制模型，研究其对电压稳定性的影响。

(1) 低电压穿越期间和结束后的无功控制

此阶段也分为低穿期间和电压恢复后两阶段，如图 5-11 所示。低穿期间无功控制包括四种：电压控制无功电流方式、曲线指定方式、指定无功功率值、指定无功电流方式。低电压结束后无功功率恢复可分为四种形式：不控制-恢复初始状态、保持一定值一段时间、以指数形式下降、以斜线形式下降；可定义低电压穿越结束后无功恢复的开始电流或保持电流，定义无功以指数形式下降或斜线形式下降时可定义恢复时间。

PSD-ST 暂态稳定程序用户手册（版本 5.5）

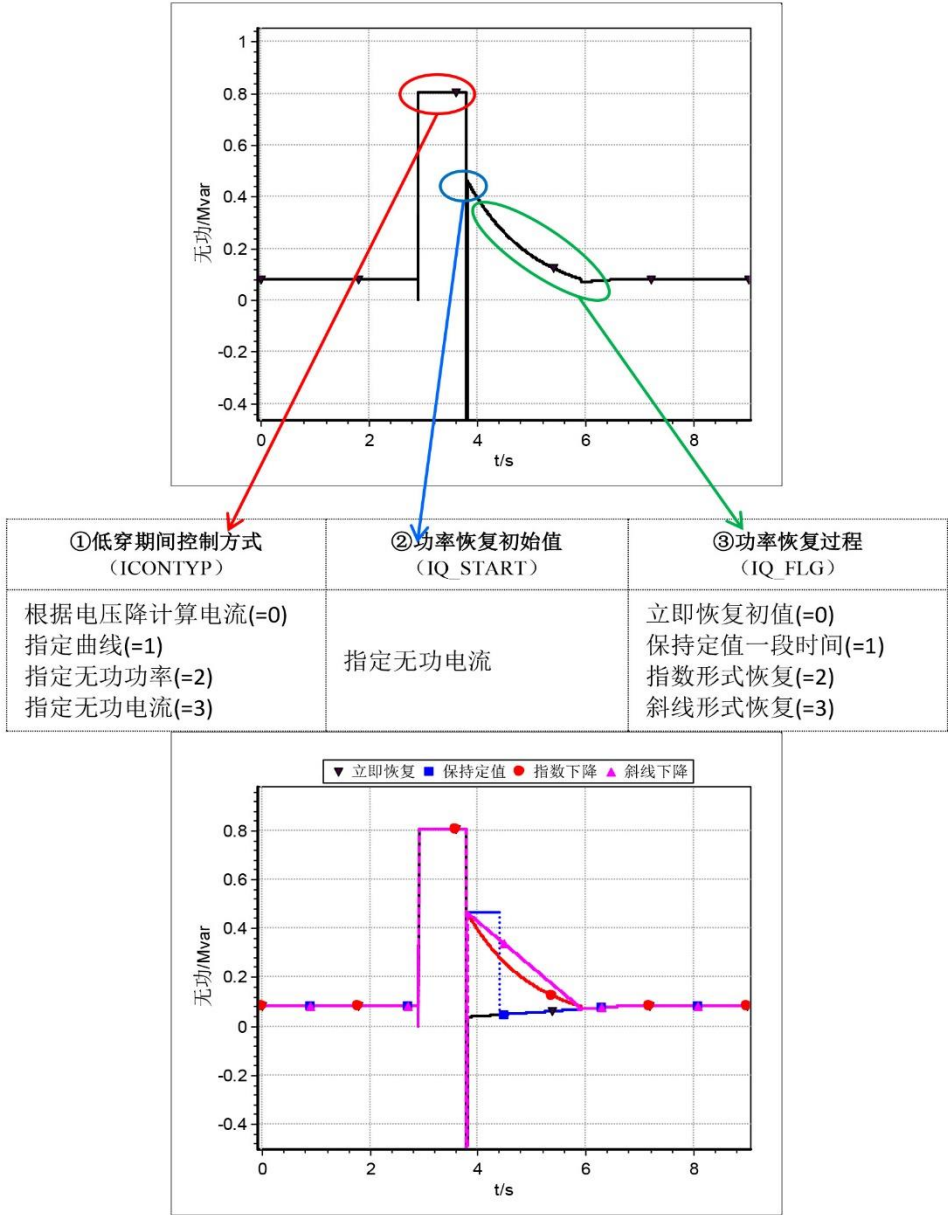


图 5-11 低电压穿越期间和结束后的无功控制

## (2) 低电压穿越期间无功控制方式的影响

无功出力的增加会减少无功功率的流动，从而提高暂态电压稳定性。本节在低穿及恢复期间无功控制选择电压控制无功电流方式，无功调整系数分别为 0（即无功输出为 0）、1、2，电压曲线及无功曲线如图 5-12 和图 5-13 所示。可以发现，光伏低穿期间无功出力越多，电压恢复越快，暂态电压稳定性越好。

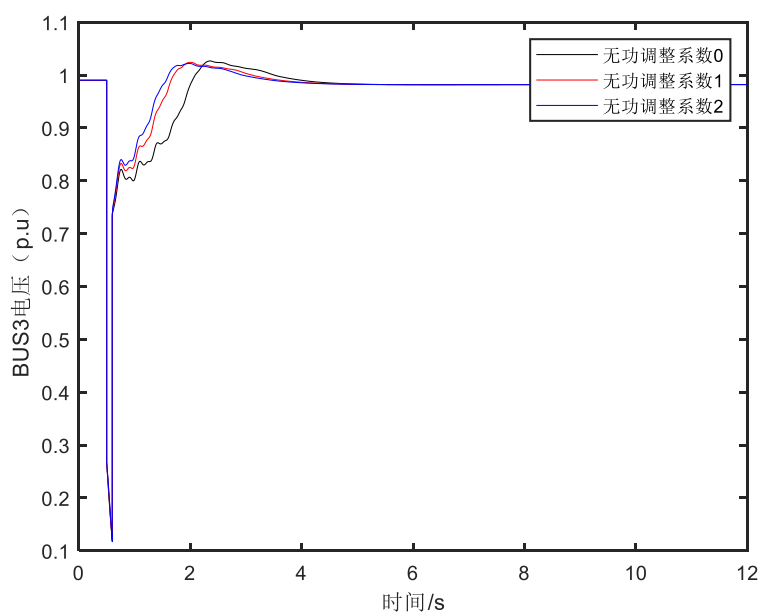


图 5-12 不同无功调整系数下主变低压侧母线电压曲线

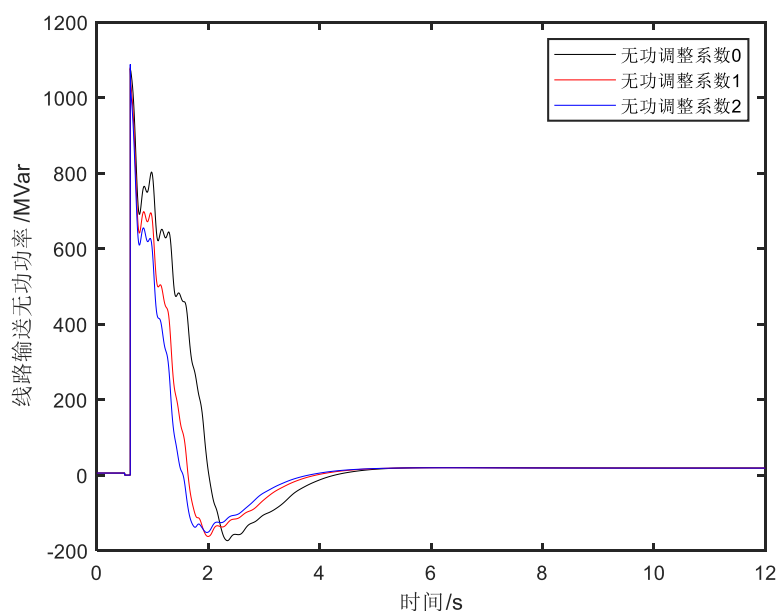


图 5-13 不同无功调整系数下线路 BUS1-BUS2 输送无功功率曲线

### 5.3 低电压穿越控制策略改进建议

#### 1) 有功功率控制策略

由上述结果可以得出，故障期间有功功率出力越多，系统的暂态电压稳定性越高，因此推荐低电压穿越期间有功功率控制策略选择定电流控制，且推荐电流设置为有功电流占初始电流 100%，提高暂态电压稳定性。

故障恢复起点和故障恢复过程的控制本质上都是确定电压恢复后光伏的输出功率，与光伏输出功率、发电机本身转动惯量和发电机机械功率有关。由于此阶段故障已经恢复，所以几乎不影响系统稳定性。建议：起点选择按低压期间实际功率或电流控制，暂态过程按照线性控制，斜率选 0.5。

#### 2) 无功功率控制策略

由上述结果可以得出，故障期间增发无功功率可以向系统提供电压支撑，减少系统的电压跌落，从而提高电力系统电压稳定性，推荐无功控制方式为定电压控制，且无功调整系数为 2。

### 5.4 本章小结

本章研究分布式光伏对电网暂态电压稳定性的影响，结合最新光伏并网标准中低电压穿越的要求，通过水火光仿真系统研究光伏渗透率、系统惯量和低穿控制策略对电压稳定性的影响，并给出分布式光伏的低穿控制策略。结果表明系统惯量及常规机组出力不变，光伏出力增加，暂态电压稳定性提高；系统惯量及电源总出力不变，光伏出力增加、常规电源出力减小，系统暂态电压稳定性提高；电源总出力不变，光伏发电替代常规机组导致系统惯量减少，系统暂态电压稳定性降低；低电压穿越期间增大有功出力或增大无功出力，均可以提高系统暂态电压稳定性。

## 第6章 结论与展望

作为我国“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”承诺下电网转型的首选电源，光伏发电发展迅速，规模呈指数级增长。然而大规模光伏发电的并网，一方面会对电力系统的稳定性带来影响，另一方面会影响系统的动态特性，使得没有考虑光伏发电系统的负荷模型不能更好的描述系统的暂态行为。本文研究含光伏发电系统的负荷模型参数辨识，并分析负荷模型参数及光伏发电系统的接入对电网稳定性的影响，主要结果如下：

(1) 介绍了负荷模型的结构以及分布式光伏的模型结构及工作原理，在 PSD-BPA 平台搭建含分布式光伏发电的配网系统，发现在光伏渗透率较高时，原有的综合负荷模型并不能很好的描述系统的动态特性，因此建立了含光伏发电系统的综合负荷模型，为后续的参数辨识工作提供模型基础。

(2) 研究了海鸥优化算法和混沌优化算法的原理，在混沌理论与海鸥优化算法的基础上，提出了一种适用于负荷模型参数辨识的新算法——混沌海鸥优化算法(COSOA)。将其应用于含有光伏发电系统的负荷模型参数辨识实例，以拟合误差和平均最优位置为指标，与经典粒子群算法(PSO)和单一海鸥优化算法(SOA)作比较，结果表明相比于 SOA 算法和 PSO 算法，COSOA 算法在收敛速度以及模型曲线拟合误差方面有明显的优势，从而证实了 COSOA 算法的优越性与实用性，可用来优化负荷模型参数。

(3) 研究了负荷模型参数对电力系统电压稳定性的影响，通过搭建单机-负荷系统研究了本文需要辨识的重要参数对电压稳定性的影响，之后分析了电压失稳机理，发现感应电动机滑差增大导致吸收较多无功，滑差不能恢复而引起电压失稳。最后以 2024 年网架下的南疆电网受电极限为指标进行负荷模型参数灵敏度分析，结果表明对电压稳定性影响最大的参数为静态负荷构成和马达占比，马达负载率、马达惯性时间常数、配网等值阻抗参数对电压稳定性的影响相比于负荷静态构成和马达占比较小。

(4) 研究了分布式光伏对电力系统电压稳定性的影响。通过搭建含水火光受端系统研究光伏渗透率、系统惯量和光伏低电压穿越控制策略对电压稳定性的影响，并给出分布式光伏低电压穿越控制策略改进建议。结果表明系统惯量及常规机组出力不变，光伏出力越高，暂态电压稳定性越高；系统惯量及电源总出力不变，光伏出力增加、常规电源出力减小，系统暂态电压稳定性提高；电源总出力不变，光伏发电替代常规机组导致系统惯量减少，系统暂态电压稳定性降低；低电压穿越期间，有功出力增大或无功出力增大，系统暂态电压稳定性提高。

虽然本文在负荷模型参数辨识及电网稳定性的方面完成了一些研究成果，但由于时间和能力有限，本文还存在一些不足之处，还有进一步改善和提高的研究空间：

（1）本文提出混沌海鸥优化算法，并将其应用于含光伏发电系统的负荷模型参数辨识中，但并未考虑参数优化策略，如果在算法中加入参数优化的策略可能会提高算法的性能和效率。

（2）本文研究分布式光伏对电压稳定的影响，在研究中发现大规模光伏发电接入会使电力系统低频振荡问题逐渐显露出来。光伏发电波动性和并网逆变器控制策略对原有系统阻尼产生影响。综合考虑光伏控制及 PSS 的控制方式是下一步研究方向。



## 参考文献

- [1] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化,2016,40(13):147-158.
- [2] 陈炜,艾欣,吴涛,刘辉.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(02):26-32+39.
- [3] 丁明,王伟胜,王秀丽,宋云亭,陈得治,孙鸣.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(01):1-14.
- [4] Emilio GHIANI,Fabrizio PILO. Smart inverter operation in distribution networks with high penetration of photovoltaic systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2015,3(4).
- [5] 赵晶晶,李新,许中.含分布式电源的三相不平衡配电网潮流计算[J].电网技术,2009,33(03):94-98.
- [6] 赵波,张雪松,洪博文.大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J].电力自动化设备,2012,32(08):95-100.
- [7] 王颖,文福拴,赵波,张雪松.高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J].中国电机工程学报,2016,36(05):1200-1206.
- [8] 陈炜,艾欣,吴涛,刘辉.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(02):26-32+39.
- [9] 朱思宇.含分布式光伏的综合负荷模型参数辨识研究[D].华北电力大学,2021.
- [10] D'Amore A, Grassia L. Comparative Study of Phenomenological Residual Strength Models for Composite Materials Subjected to Fatigue: Predictions at Constant Amplitude (CA) Loading [J]. Materials, 2019,12(20).
- [11] 王振树,卞绍润,刘晓宇,于凯,石云鹏.基于混沌与量子粒子群算法相结合的负荷模型参数辨识研究[J].电工技术学报,2014,29(12):211-217.
- [12] 张红斌,汤涌,张东霞,侯俊贤.负荷建模技术的研究现状与未来发展方向[J].电网技术,2007(04):6-10.
- [13] 鞠平,郭德正,曹路,等.含主动负荷的综合电力负荷建模研究综述与展望[J].河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 367-376.
- [14] 韩禹. 非侵入式低压电力负荷构成识别与聚合建模的研究及应用[D].江苏大学,2020.

- [15] Kosterev Dmitry N., Taylor Carson W., Mittelstadt William A.. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage[J]. Water and Energy Abstracts, 2007, 17(2).
- [16] PEREIRAL, KOSTEREVD, MACKINP, et al. An interim dynamic induction motor model for stability studies in the WSCC[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2002, 17(4): 1108-1115.
- [17] SeoEun Son, Soo Hyoung Lee, Dong-Hee Choi, Kyung-Bin Song, Jung-Do Park, Young-Hoon Kwon, Kyeon Hur, Jung-Wook Park. Improvement of Composite Load Modeling Based on Parameter Sensitivity and Dependency Analyses[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2014, 29(1).
- [18] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 考虑配电网络的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
- [19] 屈星, 李欣然, 李培强, 等. 计及配电网调压的综合负荷建模[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(06): 1695-1705+1906.
- [20] 屈星, 李欣然. 考虑配电网结构的电力系统综合负荷建模[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 117-123.
- [21] 王吉利, 贺仁睦, 马进. 配网侧接入电源对负荷建模的影响[J]. 电力系统自动化, 2007(20): 22-26+40.
- [22] 孙国霞, 张剑, 吴海江. 包含多种分布式电源的广义负荷模型辨识与适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(04): 105-111.
- [23] Samadi A, Soder L, Shayesteh E, et al. Static Equivalent of Distribution Grids With High Penetration of PV Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1-1.
- [24] 吴峰, 李玮. 含高渗透率分布式光伏发电系统的配电网动态等值分析[J]. 电力系统自动化, 2017(9).
- [25] 赵静波, 鞠平, 施佳君, 秦川. 电力系统负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(01): 87-94.
- [26] 陈三波. 统计综合法负荷建模中负荷特性综合方法的研究[D]. [硕士学位论文]. 2013.
- [27] 贺仁睦, 魏孝铭, 韩民晓. 电力负荷特性实测建模的外推和内插. 中国电机工程学报, 1996(3): 151-154.
- [28] 卜琰. 基于电能质量监测数据的负荷建模研究[D]. 山东大学, 2018.
- [29] G. Frigo, A. Derviškadić, D. Colangelo, J.P. Braun, M. Paolone. Characterization of uncertainty contributions in a high-accuracy PMU validation system[J]. Measurement, 2019, 146.

- [30] 方若水.基于PMU实测小扰动数据的负荷建模方法研究[D]. 浙江大学, 2019.
- [31] 吴沛萱,叶洪波,崔勇,等.主导负荷参数类噪声辨识的数据处理方法[J/OL].电网技术:1-8.
- [32] 李培强,李慧,李欣然.基于灵敏度与相关性的综合负荷模型参数优化辨识策略[J].电工技术学报,2016,31(16):181-188.
- [33] 黄玉龙,陈迅,刘明波,陈晓科,杨汾艳,曾艳,林舜江.动态负荷模型参数辨识的微分进化算法[J].电工技术学报,2013,28(11):270-277.
- [34] 屈星,李欣然,宋军英,等.遗传算子自适应设计及其在负荷建模中的应用[J].电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7) : 65-72.
- [35] Gaurav Dhiman, Vijay Kumar. Seagull optimization algorithm: Theory and its applications for large-scale industrial engineering problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 165.
- [36] 金亦舟,张莉萍,武鹏,牛启帆,沈依婷.改进遗传算法在含DG配电网重构中的应用[J].传感器与微系统, 2020, 39(10): 153-156.
- [37] 卞绍润. 负荷建模中的负荷特性分类及参数辨识研究[D]. 山东大学, 2014.
- [38] 吴骅,吴耀武,娄素华,王少荣,熊信银.基于改进微分进化算法的负荷模型参数辨识[J].高电压技术, 2008(09): 1977-1981.
- [39] 王振树,卞绍润,刘晓宇,于凯,石云鹏.基于混沌与量子粒子群算法相结合的负荷模型参数辨识研究[J].电工技术学报, 2014, 29(12): 211-217.
- [40] 王斌晓,黄彦全,宋廷珍,董家读.基于混沌蚁群算法的负荷模型参数辨识[J].电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 47-51.
- [41] 贺仁睦,郑晓雨,马进,唐永红.基于轨迹灵敏度的负荷参数辨识范围调整方法
- [42] 孙国霞,张剑,吴海江.包含多种分布式电源的广义负荷模型辨识与适应性研究[J].电力系统保护与控制, 2013, 41(04): 105-111.
- [43] Tang Yong, Ma Shiying, Zhong Wuzhi. Mechanism research of short-term large-disturbance voltage stability[C]. International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006.
- [44] Yasuji Sekine, Hiroshi Ohtsuki. Cascaded voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 250-256.
- [45] 汤涌,张红斌,侯俊贤,张东霞.负荷建模的基本原则和方法[J].电网技术, 2007(04): 1-5.
- [46] 曹路,励刚,武寒.马达负荷模型对华东电网暂态稳定性的影响分析[J].电网技术, 2007(05): 6-10.
- [47] 徐昊. 综合负荷模型对多机系统小扰动稳定的影响研究[D]. 华北电力大学(北京), 2011.

- [48] 邹德旭,贺仁睦,司大军.负荷模型对电力系统动态稳定的影响[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(01):118-122.
- [49] 马幼捷,龚娟,周雪松,侯明.系统负荷特性与电压稳定的关系[J].天津理工大学学报,2008(05):1-4.
- [50] 李信红.负荷特性对电力系统电压稳定性影响的研究[D].湖南大学,2017.
- [51] 李林,李运坤.考虑负荷特性的静态电压稳定性分析[J].电气技术,2011(11):33-36.
- [52] 李欣然,贺仁睦,章健,张伶俐.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999(04):3-5.
- [53] 任杰桢,鞠平,赵娟,余一平,孙建华,梁伟.考虑电动机负荷的静态电压稳定分析[J].电力自动化设备,2014,34(05):139-143.
- [54] 廖卫平,何凌枫.不同模型参数的感应电动机功率电压特性分析[J].宁夏电力,2016(03):43-50+62.
- [55] 杨秀,王瑞霄,舒海莲.交直流并联输电系统的非线性分岔分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(05):13-18.
- [56] 刘行.大规模新能源并网下可能连锁故障场景及防控措施研究[D].华北电力大学,2017.