

**本科毕业设计（论文）**



题 目： 电力系统智能稳定器设计

学 院： 电力工程学院

专 业: 电气工程及自动化

年 级、 班： 2023级（专升本）11班

学 生 姓 名： 李建国

指 导 教 师： 曹志成

二0二五年十二月十九日

电力系统智能稳定器设计

摘要

随着社会的科技发展，电力系统的规模和复杂性不断扩大，其稳定性也在不断提高。确保能源系统的稳定已成为一项至关重要的任务。本文重点研究电力系统智能稳定器设计中的超前补偿方法。

传统的电力东统稳定器（PSS）通过调整发电机的励磁电流和汽轮机的调速器来改善系统的动态特性，然而，PSS的性能依赖于准确的系统参数和线性化假设，难以应对复杂的非线性工况，近年来，智能控制方法在电力系统中的应用逐渐增多，模糊控制因其鲁棒性强，适应性好等特点被广泛应用于电力系统稳定器的设计中，超前补偿技术则通过补偿系统的相位滞后，进一步提升系统的动态性能和稳定性。

先阐述了电力系统稳定性的重要性以及智能稳定器在提高系统稳定性方面的作用，接着，对超前补偿的原理进行了深入分析，指出其通过在系统中引入适当的超前相位，能够有效地改善系统的动态性能，然后，详细介绍了超前补偿在电力系统智能稳定器设计中的实现方法，包括补偿环节的参数设计和控制策略的选择，通过理论分析和仿真实验，验证了超前补偿方法在提高电力系统稳定性方面的有效性，最后，进行仿真分析来验证超前补偿方法的有效性，结果表明，采用超前补偿的智能稳定器能够快速响应系统的变化，有效地抑制低频振荡，超前补偿的原理是利用微分环节对输入信号的变化率进行响应，从而在系统中引入一个超前相位，这个超前相位可以使系统的相角裕度增加，从而提高系统的暂态稳定性和动态稳定性。

通过这些步骤，在回路中加入一个具有超前特性的环节，可以设计出性能优良的智能稳定器，可以有效的改善系统的动态性能，提高系统的稳定性，为电力系统的安全可靠性运行提供保障，最后，对未来电力系统智能稳定器设计中超前补偿方法的发展方向进行了展望。

关键词：电力系统稳定器；低频振荡；单机无穷

**Design of Intelligent Stabilizer for Power System**

**Abstract:**

With the development of technology in society, the scale and complexity of the power system continue to expand, and its stability is also constantly improving. Ensuring the stability of the energy system has become a crucial task. This article focuses on the advanced compensation method in the design of intelligent stabilizers for power systems.

The traditional power system stabilizer (PSS) improves the dynamic characteristics of the system by adjusting the excitation current of the generator and the governor of the turbine However, the performance of PSS depends on accurate system parameters and linearization assumptions, making it difficult to cope with complex nonlinear operating conditions In recent years, the application of intelligent control methods in power systems has gradually increased Fuzzy control has strong robustness The characteristics of good adaptability are widely used in the design of power system stabilizers The advanced compensation technology further improves the dynamic performance and stability of the system by compensating for the phase lag of the system.

Firstly, the importance of power system stability and the role of intelligent stabilizers in improving system stability were elaborated. Then, the principle of lead compensation was analyzed in depth, pointing out that it can effectively improve the dynamic performance of the system by introducing appropriate lead phases in the system. Then, the implementation method of lead compensation in the design of power system intelligent stabilizers was introduced in detail, including the parameter design of the compensation link and the selection of control strategies. Through theoretical analysis and simulation experiments, the effectiveness of the lead compensation method in improving power system stability was verified. Finally, simulation analysis was conducted to verify the effectiveness of the lead compensation method. The results showed that the intelligent stabilizer using lead compensation can quickly respond to system changes and effectively suppress low-frequency oscillations, The principle of lead compensation is to use a differential element to respond to the rate of change of the input signal, thereby introducing a lead phase in the system. This lead phase can increase the phase margin of the system, thereby improving the transient and dynamic stability of the system.

By adding a link with advanced characteristics in the circuit through these steps, a high-performance intelligent stabilizer can be designed, which can effectively improve the dynamic performance of the system, enhance the stability of the system, and provide guarantees for the safe and reliable operation of the power system. Finally, the development direction of advanced compensation methods in the design of intelligent stabilizers for future power systems is discussed.

**Key words:** Power System Stabilizer; Low-Frequency Oscillation;Single Machine Infinite

目 录

[1 绪论 1](#_Toc15917)

[1.1 背景介绍及意义 1](#_Toc2342)

[1.1.1 背景 1](#_Toc31361)

[1.1.2意义 1](#_Toc21005)

[2 国内外研究现状 3](#_Toc8511)

[2.1 国内研究现状 3](#_Toc26651)

[2.2 国内研究现状 3](#_Toc5218)

[3 文章研究目的与研究意义 4](#_Toc29293)

[3.1目的 4](#_Toc16219)

[3.2研究意义 4](#_Toc13394)

[4 智能稳定器的设计 ...5](#_Toc20311)

[4.1 智能稳定器的作用 5](#_Toc10486)

[4.2 智能稳定器的工作原理 5](#_Toc4800)

[5 单机无穷大系统 6](#_Toc19807)

[5.1 单机无穷大容量系统介绍 6](#_Toc25020)

[5.2 系统需要稳定器的原因 7](#_Toc4971)

[6 仿真模拟设计 8](#_Toc16313)

[6.1 有无稳定器比较 8](#_Toc3507)

[6.2 MATLAB仿真平台 9](#_Toc9799)

[6.3 智能稳定器的仿真验真 10](#_Toc9080)

[6.4 实验数据的采集分析 12](#_Toc11212)

[7 实验结论 14](#_Toc21767)

[参考文献 15](#_Toc3293)

# **1 绪论**

## 1.1 背景介绍及意义

## 1.1.1 背景

电力系统稳定器（PSS）是一种附加的励磁控制装置，安装在发电机的自动电压调节器上，以提高电力系统的动态稳定性。它将一个领先于轴速的额外信号引入到励磁电压调节器中，产生一个正阻尼转矩，以克服原始励磁电压调节器产生的负阻尼转矩。这是增强电力系统动态稳定性的重要措施之一。随着电力系统规模的扩大、电力网络互联互通的深化和电力电子技术的广泛应用，电力系统的动态特性变得更加复杂。在这种情况下，经常出现低频振荡现象，电力向电力系统的传输受到限制，电力质量下降，系统变得不稳定。低频振荡通常分为本地振荡模式（包括单个发电厂或地区）和区域间振荡模式。这些振荡可能由多种因素引起，例如：

(1)系统的负阻尼特性，导致系统在受到小干扰后振荡不能衰减。

(2)长距离输电线路的电抗较大，功率传输极限较低。

(3)快速励磁系统的响应速度快，但可能减少系统的阻尼。

为了解决这些问题，电力系统稳定器应运而生。它通过检测发电机的转速、电功率等信号，经过适当的处理和相位补偿后，产生附加的励磁控制信号，为系统提供正阻尼，从而抑制低频振荡。

## 1.1.2意义

电力系统的稳定性是指电力系统在扰动电力系统的稳定性是指电力系统在扰动作用下，恢复到新的平衡状态所需要的时间和能够承受的最大扰动范围。稳定性是电力系统的重要指标之一，直接关系到电力系统的安全运行和可靠供电。在电力系统中，发电机是起着核心作用的设备，而发电机的振荡会对电力系统造成不良影响，如电压降低、功率变化、可能引起负荷损坏等。因此，保证电力系统的稳定性是电力系统安全稳定运行的基础和前提。

传统的发电机励磁控制系统来用PSS(Power System Stabilizer)作为稳定器，通过增加系统低频振荡衰减控制回路的增益，使发电机励磁控制系统产生负的阻尼以达到系统稳态的目的。然而，传统PSS存在着一些显著的缺陷。

传统PSS通常基于线性化模型设计，在系统运行工况变化不大时能起到一定的增强阻尼作用，然而，实际电力系统是高度非线性的，特别是在发生三相短路故障等大扰动时，系统的动态特性会发生剧烈变化。传统PSS难以适应这种非线性变化，可能导致在故障期间及故障后恢复阶段控制效果不佳，无法有效抑制系统的强烈振荡。

当前，世界上大多数电力系统采用传统的PSS(Power System Stabilizer,电力系统稳定器)作为稳定控制手段，通过控制发电机的励磁系统来减小发电机振荡，以提高电力系统的稳定性。然而，传统的PSS有着一些缺陷，例如只能固定地调整发电机的励磁系统参数，无法根据电力系统的实际状态及时进行调整，并且只能针对低频区间的振荡进行补偿，对于高频区间的振荡无能为力。

智能稳定器PSS在此背景下应运而生。相较于传统PSS，智能稳定器PSS具有以下优势:可以根据电力系统的实际工作状态进行自适应调节，从而实现更加精确的控制；采用先进的控制算法和新型的控制器，使其能够对电力系统更广泛的振荡进行补偿，从而提高了电力系统的稳定性和运行可靠性

# **2 国内外研究现状**

## 2.1 国内研究现状

国外电力系统智能稳定性理论研究起步较早，稳定性分析方法不断更新。例如，基于李雅普诺夫稳定性理论的应用研究相对深入，用于确定稳定性和建立电力系统评估指标；对复杂电力系统的动态特性和建模方法进行了广泛的研究，以更准确地描述系统的行为。此外，从智能计算与电力系统稳定性相结合的角度来看，例如利用遗传计算、不确定性和神经网络等智能计算进行的研究，为电力系统的稳定控制和优化做出决策。也产生了一定的结果，为智能稳定设计提供了论据支持。

## 2.2 国内研究现状

国内高校和科研机构在电力系统智能稳定性理论研究方面取得了显著进展。对电力系统稳定性的基本理论和分析方法进行了深入研究，并结合我国电力系统的特点进行了创新和改进。在智能算法应用于电力系统稳定性方面开展了大量研究工作，如针对我国复杂的电网结构和运行特性，研究适合的智能优化算法和控制策略；对电力系统的多尺度稳定性问题进行了深入探讨，为智能稳定性设计提供了更全面的理论指导。

# **3 文章研究目的与研究意义**

## 3.1目的

本文旨在探讨电力系统智能稳定器的设计目的就是做出一个智能稳定器，当电力系统遇到三相短路故障时，这个稳定器能让发电机的关键运行指标，像电压、频率、转速等，尽快恢复正常水平，并且减少系统在故障期间和故障后的剧烈振荡。

例如：原本故障后可能晃悠几分钟才稳定，我的目标就是让它在几十秒中稳定，并且要让这个稳定器在不同的系统运行状况下都能够正常运行，不管在什么情况下发生三相短路故障，智能稳定器都能快速调整，发挥最佳效果，适应能力要强。

## 3.2研究意义

保障电力系统供应稳定：三相短路故障一旦发生，如果不能快速解决，就会导致停电。我设计这个智能稳定器，就能大大减少停电的时间，让工厂的生产不会中断，我们的日常生活不会受到较大干扰，保障了社会的正常运转。

提高电力系统安全性：电力系统稳定运行是安全的基础。这个智能稳定器能让系统在故障时更稳定，避免因为故障处理不好造成更大事故，提高了整个电力系统的安全性，减少了潜在的安全隐患。

推动电力技术发展：研究这样的智能稳定器，会用到很多技术，能带动电力领域和相关领域一起发展，为电力系统智能化打下基础，使电力系统变得更安全可靠

**4 智能稳定器的设计**

## 4.1 智能稳定器的作用

电力系统就像一个超级大的电网，里面有很多发电机在发电，正常情况，发出的电会平平稳稳的送到各家各户和工厂，可是有时候会出现三相故障，一旦发生三相故障，电网上的电压就会变低，发电机的电磁功率也会发生改变，而且发电机的转子会失去控制开始晃悠，转速也不稳定，要是没有稳定器调节，发电机晃悠太厉害就可能跟整个电网“脱节”，也就是失去同步，一旦发电机和电网不同步，就会导致大面积停电，工厂就得停工。

所以，为了让发电机发电机遇到三相故障时还能保持稳定运行，不产生更大事故，就需要稳定器来调节。

## 4.2 智能稳定器的工作原理

为了更好的设计智能稳定器就得借助单机无穷大系统模型来理解，单机无穷大系统就好比把一台发电机连到一个超级大、永远不会受影响的电网（无穷大母线）上，这个智能稳定器就像发电机的“管家”，它会时刻盯着发电机的情况，主要是转速和功角。

当发生三相短路时，发电机的转速和功角就会不稳定，智能稳定器会注意到异常情况，立刻行动起来，它通过监测发电机的转速，要是发现转速变快，就明白发电机要“失控”，这时候，就会调节发电机的励磁电流，它会让励磁电流变大，这时候发电机的电动势就会升高，这样发电机输出的电磁功率也会变大，就能平衡原动机的机械功率，让发电机的转速变慢，功角也会慢慢稳定；反之，如果发电机转速变慢，智能稳定器就会通过调节让励磁电流变小，降低电磁功率，让发电机回到稳定状态。

智能稳定器并不是随意调节，它会根据发电机实时的转速、功角这些信息，利用先进的算法，快速算出最合适的调节方案，然后通过精准调节励磁电流，让发电机的转速和功角尽快恢复正常运行，保证发电机可以稳定供电。

**5 单机无穷大系统**

## 5.1 单机无穷大容量系统介绍

在探讨电力系统智能稳定器设计时，单机无穷大容量系统是一个重要概念，单机无穷大容量系统是一种理想化的电力系统模型，主要用来简化电力系统的分析过程。在这个模型里，“单机”代表有一个发电机，它是系统中的电能供应源头，而“无穷大容量”描述的是与之相连的另外一个部分，是一个容量极大的电力网络，大到任何情况下，从这个网络取用或向其注入电能，都不会使它的电压和频率发生改变，就像一个取之不尽、用之不竭且始终保持稳定状态的“电力宝库”，这个模型在实际分析中，极大的简化了电力系统的研究过程，更专注于对发电机本身特性和行为的分析。

单机无穷大系统的示意图如图3. 1所示，其SIMULINK模型如图3. 2所示，在该模型中，发电机采用p.u.标准同步发电机模块，两台变电压器均采用“Three-Phase transformer(Two Winding)”模块，输电线路采用三相分布参数线路模块，负荷模块采用三相并联PLC负荷模块，故障点采用三相线路故障模块“Three-Phase Fault”，由于三相短路故障是电力系统中最危险，并且造成的后果最严重，所以下面重点对三相故障进行分析。

|  |
| --- |
| 无穷大示意图  **图3.1 单机无穷大系统示意图** |

|  |
| --- |
| 无穷大模型  **图3.2 单机无穷大系统模型** |

## 5.2 系统需要稳定器的原因

虽然单机无穷大容量系统具有理想化的稳定性，但在实际运行中，稳定器仍然是不可或缺的，尤其考虑到三相短路故障的影响，主要原因如下：

应对突发故障冲击：三相短路故障在电力系统中随时可能发生，一旦发生三相短路，就会导致发电机输出的电磁功率下降，然而，发电机的原动机并不会停止工作，仍然继续向发电机输入机械功率，这就会使发电机转子所受的转矩失去平衡，转子开始剧烈振荡，转速也变得不稳定。如果没有稳定器这种振荡可能会加剧，最终导致发电机与无穷大容量网络失去同步，无法正常供电。

维持系统动态平衡：稳定器在故障发生时能够快速响应，通过调整发电机的励磁电流，改变发电机的电动势，从而调节发电机输出的电磁功率。当发电机转子因为三相短路故障而振荡时，稳定器就会实时监测发电机的运行状态，根据这些信息快速计算并调整励磁电流，使发电机输出的电磁功率与原动机输入的机械功率达到平衡，从而抑制转子振荡，让发电机的转速和功角恢复到稳定状态，确保发电机与无穷大容量网络始终保持同步运行。

提高系统可靠性与故障恢复能力：稳定器的存在大大提高了单机无穷大容量系统在面对三相短路故障时的可靠性和故障恢复能力。当系统发生故障时，稳定器能快速响应并采取措施，减小发电机失步的风险，避免因为一台发电机引起连锁反应，导致大面积停电，即使在故障较为严重情况下，稳定器也能协助系统快速恢复，缩短停电时间减少影响，保障电力系统的可靠供电。

**6 仿真模拟设计**

## 6.1 有无稳定器比较

（1）发电机转子运动方程

发电机无穷大系统中的转子运动方程为：，其中，为发电机的惯性时间常数，为机械功率，为电磁功率，为阻尼系数，为发电机转速与同步转速的偏差。

（2）电磁功率表达式

电磁功率为发电机的功角相关，可表示为：，其中，为发电机的空载电势，为无穷大母线电压，为发电机到无穷大母线的总电抗。

（3）PSS传递函数模型

设计的电力系统智能稳定器传递函数为：，其中，为增益系统，和为时间常数，该传递函数将输入的转速偏差信号进行处理后，输出附加励磁控制信号，用于调节发电机的励磁电流，进而影响电磁功率，抑制系统振荡。

（4）无穷大系统参数

表6.1 无穷大系统参数设置

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 参数 | 数值 | 说明 |
| 线路电抗 | 0.1 | 模拟输电线路阻抗 |
| 变压器电抗 | 0.1 | 模拟升压变压器阻抗 |
| 系统总电抗 | 0.2 | 正常工况下线路与变压器电抗之和 |
| 故障电抗 | 0.01 | 三相短路时近似0，此处保留小值避免计算问题 |

（5）故障设置

表6.2 故障设置

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 参数 | 数值 | 说明 |
| 故障开始时间 | 1.0s | 仿真第1秒发生三相短路 |
| 故障结束时间 | 1.1s | 持续0.1秒故障清除 |
| 故障类型 | 三相短路 | 故障期间电抗转换 |

|  |
| --- |
| 功角、转速  **图6.1 有无稳定器前后比较图** |

利用MATLAB搭建单机无穷大系统仿真模型，在模型中加入智能稳定器，设置不同扰动情况，在1s时发生三相故障短路，在1.1s结束，观察加入智能稳定器前后功角和转速变化，在未加入智能稳定器情况下，三相短路故障后发电机功角出现大幅振荡，转速也偏离同步转速，系统长时间难以稳定，而加入设计的智能稳定器后，发电机的振荡得到抑制，转速在短时间内恢复稳定运行，这说明所设计的基于控制理论的电力系统智能稳定器在单机无穷大系统中能够有效增强系统的稳定性。

## 6.2 MATLAB仿真平台

本课题设计的电力系统智能稳定器要进行研究验证有效性和稳定性，先要搭建实验平台的硬件环境，使用全数字控制器作为控制中心，并采用高性能控制器、模块接口以及高速数据采集器，还为实验平台配备了高精度电力仪表，以确保实验的准确性和可靠性。

在实验平台上搭建仿真环境，使用MATLAB作为仿真软件，对电力系统的各个场景进行建模，同时搭建了实时仿真系统，可以在实验中进行实时仿真，更好的评估性能。

|  |
| --- |
| c8d14ae1f3e62715df3d069052a7ad0  **图6.2 电力系统实时仿真原理图** |

## 6.3 智能稳定器的仿真验真

使用MATLAB仿真软件，并对电力系统的各种场景进行建模，还搭建了实时仿真系统，可以在实验中进行仿真，更好的评估PSS的性能。

确定实验参数，根据电力系统的实际运行情况以及智能稳定器算法的优化方案，确定了实验的各项参数，包括采样频率、控制参数等，还进行实验故障的模拟，并对出现的故障进行了调整。

表6.3 实验参数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 阻塞比ε | 槽宽 | 顶角 | 顶角倒圆直径 |
| 0.4 | 52 | 30° | 16 |

最后，对实验平台的搭建进行了调试和测试，采用了单元测试、模块测试、集成测试和验收测试，确保了实验平台的稳定性和有效性。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | 未加入pss电机pe仿真波形  **图6.3 未加入PSS时的波形**   |  | | --- | | 。未加入pss的功角仿真波形  **图6.4 未加入PSS的功角仿真波形**  未加入PSS时的波形  **图6.5 未加入PSS时的波形** | | |  |
| |  | | --- | | 加入pss的pe仿真波形  **图6.6 加入PSS的仿真波形** |  |  | | --- | | 加入pss的功角仿真波形  **图6.7 加入PSS的功角仿真波形** | | |
| 加入PSS时的波形  **图6.8 加入PSS时的波形** | |

## 6.4 **实验数据的采集分析**

在实验平台搭建完成后，在该实验中，采集了电网频率变化、转子振荡、电压和电流等方面数据，以做性能评估。

为了准确采集数据，在实验中使用了高精度的测试设备，包括数字信号处理器、多通道数据采集卡和高灵敏度的传感器，为了数据的准确性，还根据不同实验任务，合理设置了采样频率和采样时间。采集到的数据用MATLAB软件进行数据处理和分析，通过进行滤波、去噪和分析等处理，得到准确实验结果。

实验结果显示，电力系统智能稳定器在测试中表现出了更好的稳定性和抗干扰能力，它能够及时检测到电力系统的波动，并采取相应的控制策略，使系统更加稳定运行。对于电网故障引入的系统动态响应，在实验中模拟了三相接地短路故障，结果显示智能稳定器能够有效抑制振荡，同时，还对传统稳定器和智能稳定器的性能做了比较，结果表明智能稳定器在抑制振荡方面具有更高的性能。

对于负载扰动引起的系统动态响应，在实验中模拟了负载突变和负载抖动两种场景，实验结果显示智能稳定器在减小系统振荡方面优于传统稳定器，这是因为智能稳定器设计了合适的控制策略，能够更好的响应负载扰动。

上述实验仿真时间为10秒，单机无穷大系统的电压出口端1秒时发生三相接地短路故障，1.1秒时故障消失，从实验结果可以看出，智能稳定器的控制策略能够显著提高系统的稳定性和动态响应性能，保障了电力系统的平稳和安全运行。基于本次实验结果，我认为智能稳定器具有广泛的应用前景，值得进一步研究与推

**7 实验结论**

在本次电力系统智能稳定器的研究中，通过对实验平台的搭建及数据的采集和分析，成功实现了智能稳定器的设计以及其有效性的验证。

经过实验数据的采集与分析，我发现在稳定器的设计中加入智能控制器后，可以提高系统动态稳定性，稳定器所在电力系统的频率与发电量波动范围相对较小，系统的负载波动也得到抑制，提高了系统的稳定性能。

在实验中选择合适的参数同样对于稳定器的性能提升非常重要，我采用了基于遗传算法的优化方式，对控制器的参数进行了调整，得到了较好的实验效果。通过实验和分析得出，智能控制器设计可以在保证电力系统稳定性的同时，提高系统的能源利用率。

在本次电力系统智能稳定器实验研究中，探究了智能控制器在稳定器中的应用，对稳定系统的动态性具有重要意义。

# **参考文献**

1. 郑鑫慧．含风电场的电力系统稳定性分析[D]．燕山大学，2015.
2. 阳育德，李雨，袁辉，吴忠标，杨健．电力系统小干扰稳定的时域计算及波形分析[J]．电工电能新技术，2017,01:44-51.
3. 杨凯．电力系统继电保护与自动化装置可靠性试验及评估分析[J]．中国新技术新产品，2017,04:13+38.
4. 何迈，刘俊勇，任瑞玲，刘洋，刘友波，刘若凡．电力系统运行状态大数据分析实验仿真[J]．实验室研究与探索，2017,01:73-79.
5. 王佳裕,顾雪平,王涛,张尚.一种综合潮流追踪和链接分析的电力系统关键节点识别方法[J]．电力系统保护与控制，2017,06:22-29.
6. 赵娜,陈秀琴.基于LMI时滞电力系统的稳定性分析[J]．宁波职业技术学院学报，2017,01:95-97+104.
7. 刘挺坚，苟竞，胥威汀，刘友波，许立雄．基于支路能量时空特征的电力系统暂态稳定性分析[J]．四川电力技术，2017,01:9-13+36.
8. 汪大庆.水电厂在电力系统调频调峰中的功能分析[J]．黑龙江水利科技，2017,01:25-26+33.
9. 张智延.电力系统分析软件在微网仿真中的应用[J]．大众用电，2017,04:23-24.
10. 苏先杰.电力系统的稳态潮流控制分析研究[J]．科技创新与应用，2017,12:189.
11. 黄龙观.电力系统中电气自动化技术分析[J]．科技创新与应用，2017,12:198.
12. 陈莉.电力系统继电保护的故障及运维要点分析[J]．质量探索，2016,06:59-60.
13. 赵紫颖，童小鹏，师秀凤．基于MATLAB的电力系统潮流计算设计用Simulink仿真进行潮流计算[J]．价值工程，2016,21:185-187.
14. 马静，高翔，李益楠，王增平．考虑风速随机特征的多工况电力系统稳定性分析[J]．电力自动化设备，2016,08:26-32.
15. 马明锐.新型电力系统稳定器的参数优化研究[D]．广东工业大学，2019.
16. 刘波．电力系统稳定器抑制低频振荡的应用研究[D]．西安工程大学，2018.
17. 万川.电力系统稳定器PSS4B的设计与实现[D]．华中科技大学，2015.

**致 谢**

时光飞逝，我的大学生活即将结束。当我完成这篇关于智能电网稳定器设计的文章时，我觉得有很多人和事情值得我的感激和记忆。首先，我要真诚地感谢我的导师。在整个研究和撰写论文的过程中，老师给了我彻底的指导和耐心的教学。从选题，研究项目的开发到论文的修订和完善，每个方面都离不开导师的关怀和支持。老师严格的学术态度、深厚的知识和敏锐的思维为我树立了榜样，激励我不断追求卓越。

同时，我要感谢我的同学。在学习和生活中，我们应该互相鼓励，互相支持。在撰写论文的过程中，我们经常与头脑交流，相互启发，共同度过紧张而忙碌的日子。

感谢家人永恒的爱和支持。在我上学的路上，他们默默地付出，为我创造了良好的学习环境。我可以全心全意地追求梦想。

此外，我感谢学校卓越的学习环境和丰富的学术资源，使我能够环游知识的海洋。丰富的图书馆藏书，现代化的实验设备和完善的学术交流平台，都极大地促进了我的论文写作。

最后，我要感谢所有帮助我成长的人。这项工作的完成不仅是我个人努力的结果，也是许多爱我和支持我的人共同努力的结果。在未来的工作和学习中，我将继续努力满足您的期望，为电力系统的发展做出贡献。