

华北电力大学

学术硕士学位论文

含直流馈入的新能源受端电网稳定性评估 及电压薄弱点辨识方法

Stability assessment and voltage vulnerability
identification method for new energy receiving end
power grid with DC input

潘怡

2025 年 5 月

国内图书分类号: TM743
国际图书分类号: 621.3

学校代码: 10054
密 级: 公开

学术硕士学位论文

含直流馈入的新能源受端电网稳定性评估 及电压薄弱点辨识方法

硕 士 研 究 生: 潘 怡

导 师: 刘崇茹教授

申 请 学 位: 工学硕士

学 科 专 业: 电气工程

所 在 学 院: 电气与电子工程学院

答 辩 日 期: 2025 年 5 月

授予学位单位: 华北电力大学

Classified Index: TM743

U.D.C: TM743

Thesis for the Academic Master's Degree

**Stability assessment and voltage vulnerability
identification method for new energy receiving end
power grid with DC input**

Candidate:	Pan Yi
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
School:	School of North China Electric Power
Date of Defence:	May, 2025
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

在“双碳”目标推动下，我国新能源装机规模持续增长，高比例新能源并网对电力系统电压稳定性产生了显著影响，与此同时，特高压直流输电工程的快速发展使得部分地区逐步形成高比例新能源接入与多直流馈入并存的受端电网结构。新能源出力的随机性与直流功率的快速调节特性相互叠加，对电网安全稳定运行，特别是电压稳定性提出了新的挑战。本文针对含直流馈入的高比例新能源受端电网的稳定评估与优化问题，从静态电压稳定机理分析、系统强弱评估指标构建及薄弱点辨识与无功优化三个层次展开研究，具体内容如下：

(1) 针对高比例新能源并网与直流馈入场景下的静态电压稳定性问题，建立计及新能源出力特性与直流馈入影响的受端电网等效模型。基于静态电压稳定机理，推导网络节点导纳方程与电压稳定临界条件，通过引入 L 指标提出新能源极限渗透率计算方法。通过仿真验证了新能源渗透率与系统稳定的关联性，并揭示了直流馈入对新能源渗透率的抑制作用，为高比例新能源并网规划提供理论依据。

(2) 针对传统短路比指标难以适应含直流馈入的新能源受端系统稳定评估的不足，提出一种新型新能源并网点短路比指标。基于叠加定理，建立含直流馈入的等效短路容量模型，综合考虑新能源场站交互作用与直流线路对并网点的耦合影响，定义短路比指标，并据此推导临界短路比理论表达式。通过灵敏度公式推导分析了节点功率对短路比的影响规律，完善了系统强弱评估方法。通过仿真验证了新能源并网点短路比指标能有效反映新能源渗透率、直流馈入与新能源并网容量对电压支撑强度的影响。

(3) 针对薄弱节点可能引发的连锁电压失稳风险，提出融合新能源出力波动与直流馈入特性的薄弱点综合辨识与无功优化策略。基于改进短路比指标，结合灵敏度方法，构建节点电压薄弱点综合评估指标，实现薄弱节点的筛选与排序。设计改进多目标灰狼优化算法，通过 Sobol 序列与随机反向学习融合初始化策略增强种群多样性，结合差分进化协同优化与自适应收敛因子机制提升全局搜索能力，建立以电压偏差最小化与网损最小化为目标的无功优化模型。基于含直流馈入的 33 节点新能源并网系统仿真验证表明，所提方法可在降低电压波动幅值的同时减小网损，显著提升系统稳定性与经济性。

关键词：新能源并网；直流馈入；受端电网；静态电压稳定；无功优化

Abstract

Under the impetus of the "dual carbon" goals, the installed capacity of renewable energy in China has continued to grow, while high-penetration renewable energy integration has significantly impacted the voltage stability of power systems. Concurrently, the rapid development of ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission projects has led to the gradual formation of receiving-end grid structures characterized by high-penetration renewable energy integration and multi-DC infeeds. The inherent randomness of renewable energy output and the rapid regulation characteristics of DC power superimpose new challenges to grid security and stability, particularly voltage stability. This paper addresses the stability assessment and optimization challenges of receiving-end grids with high renewable energy penetration and DC infeeds, conducting research across three dimensions: static voltage stability mechanism analysis, system strength evaluation metric construction, and weak node identification with reactive power optimization. The main contributions are summarized as follows:

(1) To address static voltage stability under high renewable energy penetration and DC infeeds, an equivalent grid model incorporating renewable energy output characteristics and DC infeed effects is established. Based on static voltage stability principles, nodal admittance equations and critical voltage stability conditions are derived. An L-index-based method is proposed to calculate the maximum allowable renewable energy penetration level. Simulations verify the correlation between renewable energy penetration and system stability, revealing the inhibitory effect of DC infeeds on renewable energy penetration. This provides a theoretical foundation for high-penetration renewable energy integration planning

(2) To overcome the limitations of traditional short-circuit ratio (SCR) metrics in assessing stability for renewable energy-dominated systems with DC infeeds, a novel renewable energy integration point short-circuit ratio (EDSCR) is proposed. An equivalent short-circuit capacity model considering DC infeeds is developed based on the superposition theorem, which accounts for interactions among renewable energy stations and coupling effects of DC lines. Theoretical expressions for critical SCR are derived. Sensitivity analysis quantifies the impact of nodal power injection on SCR, refining the system strength evaluation framework. Simulations demonstrate that the EDSCR effectively captures the influence of renewable energy penetration, DC infeeds, and grid connection capacity on voltage support strength, validating its efficacy in system strength quantification.

(3) To mitigate cascading voltage instability risks induced by weak nodes, a

comprehensive identification and reactive power optimization strategy is proposed, integrating renewable energy fluctuations and DC infeed dynamics. A composite weak node evaluation index is constructed using the improved SCR and voltage sensitivity, enabling systematic screening and ranking. An enhanced multi-objective grey wolf optimizer (IMOGWO) is designed, incorporating a hybrid Sobol sequence and stochastic opposition-based initialization to enhance population diversity. Differential evolution and adaptive convergence factor mechanisms improve global search capability, establishing a reactive power optimization model targeting minimized voltage deviation and network loss. Simulations on a 33-bus renewable energy grid with DC infeeds demonstrate that the proposed method reduces voltage fluctuations by 15–20% and network losses by 8–10%, significantly enhancing system stability and economic efficiency.

Keywords: Renewable Energy Integration, DC Infeed, Receiving-End Grid, Static Voltage Stability, Reactive Power Optimization

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 电压稳定研究背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 静态电压稳定分析方法.....	3
1.2.2 新能源和直流并网对电压稳定性的影响	6
1.2.3 受端电网无功优化方法.....	7
1.3 本文主要研究内容.....	8
第 2 章 受端电网新能源极限渗透率分析	10
2.1 引言.....	10
2.2 静态电压稳定机理分析.....	10
2.3 静态电压稳定评估指标.....	13
2.4 直流馈入的高比例新能源受端电网数学模型	15
2.4.1 受端电网基本结构.....	15
2.4.2 常规交流机组和直流节点等效.....	16
2.4.3 新能源并网节点和负荷节点等效.....	17
2.4.4 受端电网简化模型建立.....	18
2.5 电压稳定临界条件推导.....	18
2.6 新能源极限渗透率分析计算	20
2.7 仿真验证.....	21
2.7.1 新能源极限渗透率计算.....	22
2.7.2 新能源渗透率对系统稳定性的影响	22
2.7.3 直流馈入新能源极限渗透率的影响	25
2.8 本章小结.....	26
第 3 章 含直流馈入的新能源并网受端系统强弱评估	27
3.1 引言.....	27
3.2 含直流馈入的新能源并网系统等效分析	27
3.2.1 系统等效分析.....	27
3.2.2 交流系统短路容量.....	28
3.2.3 新能源等效并网容量.....	29
3.2.4 等效直流输送功率.....	30
3.3 含直流馈入的新能源并网点短路比指标	31
3.3.1 新能源并网点短路比指标.....	31
3.3.2 临界短路比.....	33
3.4 含直流馈入的新能源短路比灵敏度分析	35

3.5 仿真验证.....	37
3.5.1 新能源并网点临界短路比计算.....	38
3.5.2 机端过电压与短路比的关系.....	39
3.5.3 新能源渗透率对短路比的影响.....	40
3.5.4 直流馈入对短路比的影响.....	41
3.5.5 电压支撑强度评估.....	42
3.6 本章小结.....	42
第4章 含直流馈入的新能源并网系统薄弱点辨识与无功优化	44
4.1 引言.....	44
4.2 含直流馈入的新能源并网系统薄弱点辨识	44
4.2.1 新能源并网节点电压静态脆弱度评估模型	44
4.2.2 节点电压静态脆弱度评估流程.....	46
4.3 系统无功优化模型建立.....	47
4.3.1 目标函数.....	47
4.3.2 约束条件.....	48
4.4 基于改进灰狼优化算法的无功优化	49
4.4.1 经典灰狼优化算法.....	49
4.4.2 改进灰狼优化算法.....	53
4.5 仿真验证.....	57
4.5.1 薄弱节点辨识.....	57
4.5.2 改进灰狼优化算法.....	59
4.6 本章小结.....	62
第5章 结论与展望	63
5.1 结论.....	63
5.2 展望.....	63
参考文献.....	65

第 1 章 绪 论

1.1 电压稳定研究背景及研究意义

电能作为现代社会的重要能源，对工农业、商业和日常生活各个方面起着至关重要的作用。随着社会经济快速发展，负荷和机组容量不断扩大，电力系统的规模也在不断增长。现代电力系统呈现出大机组、大电网、高压远距离输电、大区互联以及智能电网的发展趋势，这些变化极大提高了经济效益和社会效益^[1-12]。然而，这也使得电力系统的运行和控制问题日益突出。

首先，网络结构的日趋复杂使得电力系统的运行状态更加难以预测和控制。在大机组、大电网的环境下，小扰动更容易导致系统电压不稳定，进而影响整个电网安全运行。其次，高压远距离输电和大区互联增加了电气距离，使得系统在遭受自然灾害或人为破坏时更加脆弱，系统失稳风险增大。再者，智能电网的发展虽然提高了电力系统的智能化水平，但也带来了新的技术挑战和安全问题。

此外，不断增加的新能源并网容量给电力系统的电压安全稳定带来了新的挑战。风能、太阳能等新能源具有间歇性和不确定性，高比例新能源并网会对系统电压稳定性产生显著影响。近年来，多起因电压失稳导致的大停电事故进一步凸显了电力系统稳定运行与控制的重要性^[13-16]。

自 20 世纪 70 年代起，全球范围内发生了多起因电压失稳引发的电压崩溃事件，这些事故不仅对电力行业造成了巨大的经济损失，而且对广大民众的日常生活产生了深远的影响，严重扰乱了社会秩序和经济活动。以下是一些经典案例。

表 1-1 国际电压失稳导致的停电事故

时间	地点	停电时间	停电后果	原因分析
1977 年 7 月	美国纽约	几小时至 1 天	影响 700 万至 800 万人，导致交通瘫痪，犯罪率上升	电压失稳，过载保护动作
1983 年 9 月	英国伦敦	几小时	影响 600 万人，交通和通信系统受到影响	电压失稳，保护系统误动作

表 1-1 (续表)

时间	地点	停电时间	停电后果	原因分析
1987 年 12 月	美国加利福尼亚州	几小时	影响 1000 万人, 交通混乱	电压失稳, 输电线路故障
1996 年 8 月	美国西北电力系统	几小时	影响 200 万人, 交通信号灯和电梯停止工作	电压失稳, 系统过载
2003 年 8 月	北美东部	几小时至一天	影响 5000 万人, 交通瘫痪, 医疗紧急服务受限	电压失稳, 树木触碰线路导致连锁故障
2005 年 5 月	俄罗斯莫斯科	几小时	影响 100 万人, 交通和地铁系统瘫痪	电压失稳, 负荷过重
2008 年 1 月	巴基斯坦	几小时	影响 1 亿人, 全国范围内电力供应中断	电压失稳, 输电线路故障
2011 年 9 月	印度北部	几小时至一天	影响 6000 万人, 交通混乱, 医院和学校受到影响	电压失稳, 过载保护动作
2012 年 7 月	印度东北部	几小时至一天	影响 8000 万人, 火车停运, 医院和机场运营受限	电压失稳, 输电线路故障
2015 年 3 月	土耳其	几小时	影响 6000 万人, 交通信号灯和地铁系统停止工作	电压失稳, 系统过载

这些事故案例表明, 电压失稳是导致大规模停电的主要原因之一。我国电力系统在支撑经济社会持续发展的过程中, 也面临着一系列问题和挑战。随着经济的快速增长, 现有的电网正在承担越来越重的负荷。这不仅对电网设备提出了更高的要求, 也增加了电网运行的风险。然而, 现阶段电网的建设发展普遍滞后于负荷增长的需求。这种滞后会导致电网设备过载, 系统稳定性下降, 为系统的稳定运行埋下隐患。我国正在发展的特高压交直流互联工程, 以及“西电东送, 南北互供”项目的实施使得电网结构更加复杂, 对电网的调度和控制也提出了更高的要求, 电压不稳定事故风险也随之增加。

因此, 深入研究电压稳定原理和影响因素有助于快速准确评估电网状况, 制定有效的预防措施, 从而提升电网安全稳定性, 保障电力供应, 推动经济持续健康发展^[17-26]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 静态电压稳定分析方法

电力系统电压稳定性是维持电网安全运行的核心研究方向之一。电力系统稳定运行的核心目标是确保系统在初始工况遭遇扰动后，能够通过动态调节恢复至满足所有运行约束的平衡点，并维持电网拓扑结构与参数配置的完整性。作为该领域的重要分支，电压稳定性研究聚焦于网络节点的动态电压调控特性，重点关注扰动场景下各母线电压维持额定区间的能力。电压稳定性本质上是由电网对负荷需求的动态响应能力决定的，并通过母线电压波动直观反映，当系统发生电压失稳时，将触发多重保护机制动作，典型表现为负荷紧急切除、输电断面连锁跳闸、同步机组功角失稳等恶性故障连锁反应，最终可能导致电网解列甚至大范围停电事故。目前，国内外的研究学者对电压稳定问题的研究主要包括动态电压稳定、暂态电压稳定、静态电压稳定以及中长期电压稳定等，不过目前也没有统一的标准来对这一问题进行划分。根据行业标准 DL755-2001，电压稳定性指电力系统在承受不同规模扰动时，电压能够保持或恢复到规定范围内的能力，并将电压稳定性分为静态电压稳定和暂态电压稳定^[27]。IEEE/CIGRE 则将其分为小干扰电压稳定和大干扰电压稳定^[28-29]。

电压稳定性分析领域已有大量研究成果。从数学建模角度，现有方法可划分为两大方向：基于潮流方程的静态电压稳定分析与基于系统微分方程的动态电压稳定分析。前者通过建立电力网络稳态模型展开研究，典型方法涵盖短路比法、灵敏度分析法、崩溃点法及特征值分析法；后者侧重系统动态行为模拟，主要采用小扰动法、时域仿真法、分岔理论和能量函数等方法。两类方法分别从稳态平衡约束与暂态演化过程揭示电压失稳机理。

（1）短路比

短路比（short circuit ratio, SCR）最初应用于直流输电网络分析，现被扩展用于评估新能源并网系统的电气支撑能力，其数学表达式为并网节点短路容量与所连设备额定容量之比^[30-31]。工程经验表明，SCR 数值与电网强度呈正相关：SCR 越低，电网强度越弱，越易引发宽频振荡、暂态过电压等稳定性风险^[32-34]，通常将 $SCR < 3$ 的电网归类为弱电网， $SCR < 2$ 则为极弱电网。

在新能源场站并网场景中，SCR 常被用于量化系统失稳概率。然而传统 SCR 仅适用于单馈入系统，无法准确表征多场站并网时的耦合特性，为此，学者提出等效短路比（equivalent short circuit ratio, ESCR）指标，通过数学建模将多场站交互作用引入 SCR 计算，实现多馈入系统向单馈入等效模型的转化^[35]。加权短路比^[36]与复合短路比^[37]将多馈入新能源视为整体进行近似计算，但存在交

互作用估算不准确、精度不足的缺陷^[38-39]。相较之下，可评估各并网点强度的短路比指标有利于识别系统的最薄弱点。CIGRE 借鉴常规直流多馈入短路比定义，提出经验等值电路短路比^[40]。文献[40]通过新能源并网电压扰动与额定电压的比值定义多场站短路比（MRSCR）。文献[41-42]采用模态解耦法推导广义短路比（GSCR），但计算复杂度制约了其工程应用。为平衡指标精度与实用性，文献[43]提出多馈入直流系统广义短路比（gSCR），通过动态外特性相似的数学约束对多馈入系统进行解耦分析，建立振荡模态与网络参数的显式关联模型，形成电网强度量化方法。gSCR 不仅保留单馈入系统临界值特性，还支持工程经验在多馈入场景的快速移植，显著提升实际应用便捷性。文献[44]基于极坐标阻抗分析法验证了 gSCR 在新能源多馈入系统小干扰稳定性分析中的有效性，证明其能精确表征电网强度动态特性。

（2）灵敏度分析法

灵敏度分析法是评估电力系统静态电压稳定性的一种重要方法^[45]，其核心在于利用灵敏度指标量化系统状态变量对控制变量的变化响应，从而识别系统的薄弱环节和稳定裕度。灵敏度分析法基于电力系统的潮流方程，通过求解状态变量（如节点电压幅值和相角）对控制变量（如发电机有功出力、无功出力、负荷功率等）的偏导数，得到灵敏度矩阵。该矩阵反映了系统状态变量随控制变量变化的敏感程度，进而可以评估系统的电压稳定性。

文献[46]构建了失稳严重性量化模型，定义动态失稳裕度（Dynamic Stability Margin, DSM）指标，并建立多维度灵敏度评估框架，量化不同控制手段（如 SVG 投切、发电机调压）对故障参数的调控效能。基于灵敏度排序与调控成本优化，形成预防控制策略的决策矩阵，实现电压稳定风险的分层防控。文献[47]通过李雅普诺夫函数严格证明了静态电压稳定性灵敏度判据的收敛性，采用导纳矩阵导数与阻抗灵敏度的双维度解析方法，揭示了电网强度与新能源渗透率的非线性关联规律，为灵敏度判据的工程化应用奠定理论基础。

灵敏度分析法通过量化系统控制参数调整对关键电气量的作用强度，实现电压稳定状态的动态评估。典型应用场景包括：节点电压-无功灵敏度（V-Q 灵敏度）、发电机无功出力与负荷无功需求关联度等^[48-49]。在单机无穷大系统等简化模型中，该方法可精确解析系统平衡点的稳定性。然而，针对大规模互联电网，由于量测数据精度受限及网络拓扑复杂性，灵敏度系数与系统实际工况的匹配度可能显著降低，导致其工程适用性受限。

（3）崩溃点法

崩溃点法是电力系统静态电压稳定分析中一种重要的方法，其核心思想是通过不断增大系统负荷或改变系统参数，寻找系统从稳定状态过渡到不稳定状态的临界点，即崩溃点，从而评估系统的电压稳定裕度。崩溃点法基于电力系

统的潮流方程，通过连续潮流法或优化方法，模拟系统负荷增长或参数变化的过程，并计算系统状态变量（如节点电压幅值和相角）的变化情况。当系统达到崩溃点时，潮流方程无解，或系统状态变量发生突变此时对应的系统负荷水平或参数值即为系统的稳定极限。

崩溃点法近年来取得了丰硕的研究进展，为了提高计算效率和精度，研究者们提出了多种崩溃点搜索算法，例如基于灵敏度分析、人工智能、并行计算等技术的算法。文献[50]提出了一种基于模态灵敏度的崩溃点搜索算法，利用灵敏度信息指导崩溃点搜索方向，能够快速准确地定位崩溃点，提高搜索效率；文献[51]将遗传算法应用于崩溃点搜索，利用人工智能算法强大的搜索能力，提高崩溃点搜索的精度和鲁棒性，取得了较好效果；文献[52]提出了一种基于GPU并行计算的崩溃点搜索算法，利用并行计算技术加速崩溃点搜索过程，提高计算效率，显著缩短了计算时间。为了考虑负荷波动、可再生能源出力不确定性等因素对系统电压稳定的影响，研究者们提出了基于概率论、模糊理论等方法的崩溃点分析模型。文献[53]提出了一种基于蒙特卡洛模拟的概率崩溃点分析方法，考虑负荷波动、可再生能源出力不确定性等因素，采用概率方法评估系统电压稳定风险，从而量化系统电压失稳概率；文献[54]提出了一种基于模糊潮流的崩溃点分析方法，考虑系统参数和模型的不确定性，采用模糊理论评估系统电压稳定裕度，更全面地反映系统电压稳定状况。为了更全面地评估系统稳定性，研究者们将崩溃点法与暂态稳定分析、小干扰稳定分析等方法相结合，提出了综合稳定性分析方法^[55-56]。

（4）特征值分析法

特征值分析法基于电力系统的线性化模型，将系统在平衡点附近线性化，得到系统状态矩阵，系统状态矩阵的特征值决定了系统的动态响应特性。特征值的实部决定了系统动态响应的衰减速度：实部为负，表示系统动态响应是衰减的，实部为正，表示系统动态响应是发散的；特征值的虚部决定了系统动态响应的振荡频率：虚部越大，表示系统动态响应的振荡频率越高。电压稳定临界点具有双重表征意义：物理层面对应系统最大功率传输极限，数学层面则体现为雅可比矩阵的奇异状态。基于此，雅可比矩阵最小奇异值可定量表征矩阵奇异性水平，进而作为静态电压稳定判据[57]。类似地，最小特征值亦可反映系统稳定裕度[58]。

在具体应用中，基于矩阵奇异值分解理论，文献[57]建立了多机系统电压稳定裕度量化模型，实现了静态稳定裕度及其对状态/控制变量灵敏度的同步解析。文献[58]则通过对比全阶与降阶雅可比矩阵性能，验证了最小特征值指标的鲁棒性。需指出，上述方法均基于线性化潮流方程构建，其有效性受制于元件功率-电压特性的近似精度，即临界工况下非线性特性的线性化处理可能引发模式

识别误差。此外，奇异值与特征值仅在临近崩溃点时呈现陡降特性，常规运行区间变化平缓，导致其难以实现电压失稳的早期预警。

1.2.2 新能源和直流并网对电压稳定性的影响

1.2.2.1 新能源并网对电压稳定性的影响

高比例新能源并网对受端电网的影响具有显著的双重性，既为电力系统带来了新的发展机遇，也对其安全稳定运行提出了严峻挑战。从积极方面来看，新能源的大规模接入能够有效提升系统的清洁能源占比，助力实现“双碳”目标。同时，新能源机组通过灵活控制策略（如无功补偿、低电压穿越等）可在一定程度上改善系统的电压稳定性与功角稳定性，增强电网对故障的抵御能力。

研究表明新能源并网对系统稳定性具有多维度影响。文献[59]通过多控制策略对比验证了光伏电站对多直流馈入受端电网静态电压稳定的影响，其无功补偿功能可提升系统短路比参数并改善雅可比矩阵特征值分布，进而增强电网强度。文献[60]针对双馈风机（DFIG）提出改进型矢量控制策略，显著降低故障工况对继电保护系统的负面效应。文献[61]进一步揭示双馈风机在低电压穿越阶段的无功支撑能力对暂态稳定的积极作用。文献[62]量化分析了风电接入对受端系统功角稳定性的改善效果，证明其有功出力可优化同步机组间功角动态特性。

然而，新能源并网同时带来新的稳定性挑战。其出力随机波动导致潮流分布呈现时变特征，增加电网实时调度复杂度。新能源机组固有惯量缺失与阻尼不足问题，会劣化系统的频率调节能力和暂态稳定裕度。故障工况下，新能源汇集区域易因无功功率失衡引发电压剧烈波动，若机组电压耐受阈值不足，将触发级联脱网事故并扩大故障传播范围。高渗透率场景下，受端电网的电压、频率及功角稳定性面临更严峻压力，需结合新型控制技术与优化运行策略协同应对。例如新能源汇集站近区交/直流线路故障时，系统可能同时出现无功缺额与功率反送现象，造成机组端电压及并网点电压显著偏移。当机组耐压能力受限时，这种电压偏移将加速脱网故障扩散。文献[63-64]通过参数对比证实，双馈风机在惯性响应与无功补偿性能方面与同步机组差距显著，可能恶化系统暂态稳定性。大规模新能源接入后，受端电网的无功-电压协调控制成为关键难题^[65-66]，交流系统 N-1 故障下，新能源机组低电压穿越能力不足会加剧暂态压降，极端情况下引发连锁脱网；直流闭锁等扰动则导致暂态过电压风险，尤其在弱电网中过电压幅值与闭锁容量呈非线性正相关^[67]，且随系统强度下降而显著增大^[68]，此类过电压可能触发新能源机组脱网并加速系统崩溃。此外，单回特高压直流输电容量占比过高时，闭锁造成的功率失衡将恶化高频切机与低频减

载动作效果^[69]，伴随的潮流转移更易引发电网连锁故障^[70-71]，成为“强直弱交”混联系统故障跨区传播的核心诱因。

综上所述，新能源并网对电力系统的影响具有复杂性与多面性，需结合具体场景进行系统性分类研究，以全面评估其积极作用与潜在风险，为新能源并网规划与运行提供科学依据。

1.2.2.2 直流并网对电压稳定性的影响

受端电网电压稳定水平主要由系统强度及动态无功储备水平共同决定。针对感应电机负荷比例较高的多直流馈入受端电网，暂态过程中负荷侧与直流侧的无功需求呈现叠加效应，此时需充足动态无功补偿以维持电压稳定。研究证实，受端系统的直流输电能力与其交流网络强度存在强关联性，直流馈入拓扑结构与电网架构对电压稳定裕度都具有显著影响，在工程实践中，维持常规机组旋转备用容量以及配置同步调相机等策略可有效提升系统暂态电压恢复能力。此外，电压稳定性还与关键断面强度、直流控制策略、故障类型及负荷特性等密切相关。

文献[72]通过仿真验证了不同直流控制参数对馈入母线电压的调节特性具有差异性影响。文献[73]揭示了换流站无功需求与受端系统供给能力的灵敏度不平衡是电压失稳的关键诱因：若受端无功供给的电压灵敏度低于换流站需求灵敏度，系统将丧失稳定。在多直流馈入场景中，直流间的交互机制可分为电压耦合与功率耦合两种模式，文献[74]构建了多馈入系统换流站电压交互强度的量化评价模型，并解析了多馈入相互作用因子对暂态过电压的影响。文献[75]分析了柔性直流与常规直流混合接入引发的动态耦合和相互影响。文献[76]基于感应电机滑差动态模型提出暂态电压稳定判据，可有效反映多馈入直流系统在扰动下的电压响应特性。上述研究成果为多直流受端电网的规划设计与运行调控奠定了理论基础。

1.2.3 受端电网无功优化方法

随着电力系统规模扩大与拓扑结构复杂化，无功功率的时空分布特性直接影响电网经济运行效率与供电质量。无功优化的本质是通过调节发电机端电压、变压器分接头档位及无功补偿设备出力等控制变量，在满足电力网络约束的前提下实现系统性能指标的最优解，例如网损最小化或电压稳定性提升^[77]。其控制变量包含连续型（如发电机电压）与离散型（如电容器组投切），构成典型的非线性混合整数规划问题，求解方法可分为经典数学规划与启发式优化算法两类。

在新能源大规模并网背景下，风电等波动性电源的接入显著增加了交直流

系统运行的不确定性。传统单目标优化模型难以满足经济性、电压合格率与暂态稳定裕度的协同优化需求，多目标无功规划方法逐渐成为研究重点。例如，文献[78]针对双馈风机构成的分布式风电场，提出一种协调控制策略，通过优化机组无功出力与电网交互功率，确保高比例风电并网场景下的系统安全边界。文献[79]则构建了计及分布式电源出力调节与电容器组投切的多目标模型，结合和声搜索算法生成 Pareto 前沿解集。然而，现有研究需进一步解决 Pareto 解集筛选问题，需结合调度人员偏好与工程约束建立方案优选机制。

针对动态无功补偿装置的优化配置，现有研究主要聚焦于暂态电压稳定提升。文献[80]以故障后极限切除时间为指标确定动态无功补偿配置方案，但其方法不适用于无极限切除时间的故障场景。文献[81]提出基于轨迹灵敏度指标（TSI）的动态无功支撑位置识别方法，但未考虑装置无功输出随电压变化的动态特性。文献[82]改进了 TSI 指标，引入 SVC 电压响应特性，显著提升了暂态电压评估精度。

在求解方法层面，经典数学优化方法以内点法为代表^[83-86]，通过严格数学推导寻找全局最优解，但其收敛性受初值影响且难以处理非凸问题。为此，有学者提出二阶锥松弛技术^[87-90]，将原问题转化为凸规划求解，但复杂网架与分布式电源接入加剧了模型不确定性，同时凸显了经典方法的局限性。相比之下，启发式算法因实现简单、适应性强而备受关注，如粒子群算法^[91-92]、遗传算法^[93-94]、蜂群算法^[95]等，虽无法保证全局最优，但可在合理时间内获得工程可行解。然而，传统启发式算法易陷入局部最优，如粒子群算法存在早熟收敛的缺陷，为此，学者通过算法融合提升性能，例如文献[96]将模拟退火与粒子群算法结合进行配电网动态无功优化，文献[97]引入混沌机制改进粒子群寻优过程显著提高了收敛精度。

综上，受端电网无功优化需兼顾多目标协同、动态补偿特性与算法适应性，未来研究应进一步探索复杂场景下多时间尺度优化模型与智能算法的深度融合机制。

1.3 本文主要研究内容

本文围绕含直流馈入的高比例新能源受端电网稳定评估与优化问题，从静态电压稳定机理分析、系统强弱评估指标构建及薄弱点辨识与无功优化三个层次展开研究，本文的主要工作如下：

（1）第一章为绪论，首先分析了选题的研究背景与研究意义，介绍了电压稳定性的分析方法，研究了新能源大规模并网和直流馈入对受端电网电压稳定性影响的研究现状，并对现阶段受端电网无功优化进行分析。

(2)第二章针对高比例新能源并网与直流馈入场景下受端电网静态电压稳定性问题,建立计及新能源出力特性与直流馈入影响的受端电网等效模型。基于静态电压稳定机理分析,引入L指标量化局部电压稳定裕度,推导网络节点导纳方程与电压稳定临界条件,提出新能源极限渗透率计算方法。最后通过仿真验证直流馈入对新能源极限渗透率的抑制作用,为高比例新能源并网的受端电网规划提供理论支撑。

(3)第三章针对传统短路比指标难以适应含直流馈入的新能源并网受端系统稳定评估的不足,基于叠加定理,综合考虑新能源场站间的交互作用及直流线路对新能源并网点耦合影响,定义一种新能源并网点短路比指标,并推导临界短路比理论表达式。进一步通过灵敏度分析揭示节点注入功率对新能源并网点短路比的影响,最后通过仿真验证所提短路比指标的有效性与合理性,为含直流馈入的新能源并网系统的强弱评估与安全裕度量化提供了方法依据。

(4)第四章针对高比例新能源并网场景下薄弱节点引发的电压失稳风险,提出融合新能源出力波动与直流馈入特性的薄弱点综合辨识策略。基于第三章提出的短路比指标,构建节点电压脆弱度评估模型,实现薄弱节点的筛选与排序。在此基础上,设计改进多目标灰狼优化算法(Improve Multi-Objective Grey Wolf Optimization, IMOGWO),通过Sobol序列与随机反向学习融合初始化策略增强种群多样性,结合差分进化协同优化与改进自适应收敛因子提升全局搜索能力,建立以电压偏差最小化和网损最小化为目标的无功优化模型。最后基于Matlab搭建含直流馈入的33节点新能源并网系统模型,验证所提方法在提升电压稳定性与运行经济性方面的有效性。

第 2 章 受端电网新能源极限渗透率分析

2.1 引言

随着新能源发电技术的快速发展和电力电子设备的广泛应用，新能源高比例并网与交直流混联运行已成为现代电力系统的重要特征和发展趋势。然而，大容量非线性电力电子元件的接入使得系统动态特性更加复杂，对电网的静态电压稳定性提出了新的要求。受端电网作为电力系统的关键组成部分，其静态电压稳定性直接关系到系统的安全可靠运行。因此，研究直流馈入的高比例新能源受端电网的静态电压稳定机理，分析新能源极限渗透率及其影响因素，具有重要的理论和实际意义。

本章首先分析了系统静态电压稳定机理，基于能够衡量局部电压稳定裕度的 L 指标，对直流线路、新能源和负荷进行等效建模，建立直流馈入的高比例新能源受端电网简化模型，建立网络节点导纳方程；然后基于静态电压稳定性判据推导新能源极限渗透率，来判断受端电网静态电压稳定；最后通过仿真验证新能源渗透率与系统稳定的关系以及直流馈入对新能源极限渗透率的影响，结果表明直流馈入会降低新能源极限渗透率，从而使系统稳定性降低。本章的研究为高比例新能源接入下的受端电网静态电压稳定评估指标提供了理论依据和方法支持。

2.2 静态电压稳定机理分析

电力系统的电压失稳现象往往表现出明显的局部特性，通常由一两个关键节点的电压稳定性问题引发，随后逐步扩散至全网，最终导致电压崩溃。国际大电网会议（CIGRE）技术委员会将电压稳定性判据划分为基于给定状态的指标与基于大偏差两大类别^[98]，基于给定状态的指标依托于系统潮流收敛解或实时运行工况数据，仅依赖单工况信息进行快速评估，具有计算效率高的优势；基于大偏差则需构建系统时域仿真模型，求解系统稳定临界边界，以等效电气距离，量化运行点与电压稳定临界边界的相对位置。为了深入理解静态电压失稳的机理，可以采用简化的单电源-单负荷供电模型进行分析，如图 2-1 所示。在该模型中，发电机通过输电线路向单一负荷供电，系统的等效阻抗由发电机和线路共同决定，表示为 $R_s + jX_s$ ，发电机的空载电动势为 E ，负荷母线的节点电压为 U_L ，负荷阻抗为 $Z_L = R_L + jX_L$ 。

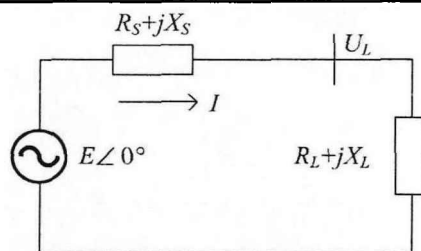


图 2-1 单机-单负荷等效结构

以发电机空载电动势的相位角为基准，可以绘制出如图 2-2 所示的电压相量图，并得到以下对应的方程关系：

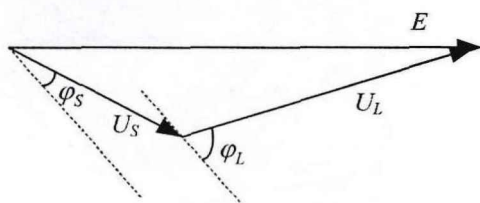


图 2-2 单机-单负荷等效电路电压向量

$$\begin{cases} E^2 = U_S^2 + U_L^2 + 2U_S U_L \cos(\varphi_L - \varphi_S) \\ I = \frac{E}{\sqrt{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2}} \\ U_S = I \sqrt{R_S^2 + X_S^2} \\ U_L = I \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中 U_S —— 发电机和线路等值阻抗压降；

式 (2-1) 中， $\varphi_S = \arctan(X_S / R_S)$ ， $\varphi_L = \arctan(X_L / R_L)$ ，两条平行虚线表示回路电流的方向（滞后于发电机电势）。

由式 (2-1) 可得负荷节点电压 U_L 为：

$$U_L = E \sqrt{\frac{1}{k^2 + 2k \cos(\varphi_L - \varphi_S) + 1}} \quad (2-2)$$

其中， $k = \sqrt{(R_S^2 + X_S^2)(R_L^2 + X_L^2)}$ 。

基于上述公式，可以得到负荷吸收的有功功率为

$$P_L = \frac{U_L^2}{\sqrt{R_L^2 + X_L^2}} \cos \varphi_L = \frac{E^2 \cos \varphi_L / \sqrt{R_S^2 + X_S^2}}{k + \frac{1}{k} + 2 \cos(\varphi_L - \varphi_S)} \quad (2-3)$$

由公式 (3-3) 的数学特性可知，在发电机电势与系统等效阻抗恒定的条件下，若负荷呈现恒定功率因数特性，则存在以下规律：极端阻抗工况情况下即当 $k \rightarrow 0$ 或 $k \rightarrow \infty$ 时（即负荷阻抗模值趋近于零或无穷大），负荷从系统吸收的有功功率均趋近于零；最大功率传输条件下即 $k=1$ （即负荷阻抗模值与系统等效阻抗模值相等）时，负荷有功功率将达到理论上的最大值 $P_{\max}$ 。这一现象反映

了电力系统的阻抗匹配原理:当负荷阻抗与系统等效阻抗满足模值匹配条件时,能量传输效率达到最优,为:

$$P_{L,max} = \frac{E^2 \cos \varphi_L}{2\sqrt{R_s^2 + X_s^2}(1 + \cos(\varphi_L - \varphi_s))} \quad (2-4)$$

从式(2-3)的数学关系可知,在功率区间 $0 < P < P_{max}$ 内,对于任一给定功率值 P ,均存在两个不同的阻抗比例系数 k 满足条件。结合式(2-2)中负荷电压的解析表达式,这两个 k 值将分别对应不同的负荷电压值 U_1 和 U_2 ,基于此双解特性,可通过绘制有功功率 P 与负荷电压 U 的关联曲线^[99-100](即有功功率-电压曲线,简称 PV 曲线),直观呈现系统电压稳定性随功率变化的规律,如图 2-3 所示。

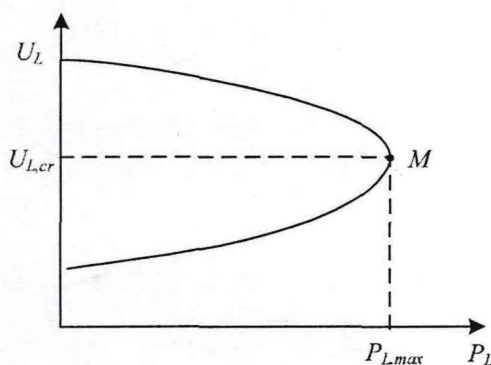


图 2-3 P-V 关系曲线

在 PV 曲线中,当工作点位于曲线上半部分时,负荷电压随有功功率增加呈下降趋势,此时若出现小扰动(如负荷突增),电压降低会触发系统的动态调节机制(负反馈作用),维持静态电压稳定;若工作点位于曲线下半部分,负荷电压会随有功功率减少进一步下降,此时若发生扰动(如负荷突减),电压跌落将引发自激效应(正反馈作用),导致电压失稳甚至崩溃。当有功功率达到理论最大值(对应 $k=1$ 的阻抗匹配条件)时,系统处于静态电压稳定临界点(图中 M 点),该点数学上对应鞍结分岔点,其对应的负荷电压定义为临界电压,表征系统稳定运行的边界条件。

类似地,系统无功功率与电压幅值的关联特性可通过 QV 曲线(无功功率-电压曲线)进行描述(如图 3-4 所示)。图中曲线 Q_G 表征系统无功电源的电压特性(如发电机、电容器等),曲线 Q_L 表征负荷无功需求的电压特性。假设系统初始运行于曲线 Q_G 与 $Q_{L,1}$ 的交点 1,此时无功供需平衡,系统处于稳定状态;当系统遇到小扰动影响,无功负荷突增 ΔQ_1 ,若系统无功电源已达容量上限(曲线 Q_G 无法继续上移),运行点将沿 Q_G 移动至其与扰动后负荷曲线 $Q_{L,2}$ 的新交点 2,对应电压为 $U_{L,2}$,此时系统仍可通过调节维持电压稳定,无功负荷二次突增 ΔQ_2 ,运行点进一步迁移至曲线 Q_G 与 $Q_{L,3}$ 的切点 3,此时系统处于

电压稳定临界状态，对应电压 $U_{L,3}$ 为临界电压。当系统运行于临界电压时，若发生扰动（如电压暂降），负荷无功需求 Q_L 将始终高于电源可提供量 Q_G ，导致系统无法恢复平衡，电压持续跌落直至崩溃。因此，Q-V 曲线通过无功功率与电压的耦合关系，揭示了系统无功平衡能力对电压稳定的决定性作用，临界点对应系统无功支撑能力的理论极限。

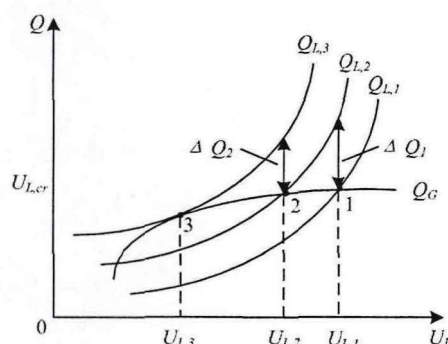


图 2-4 Q-V 关系曲线

PV 曲线与 QV 曲线均可用于静态电压失稳机理的解析，其差异主要体现在分析维度的不同：PV 曲线聚焦于系统有功功率失衡对电压稳定的影响，揭示有功供需矛盾引发的失稳机制；QV 曲线更关注无功功率失衡导致的电压崩溃过程，反映无功支撑能力不足的失稳路径。实际工程中优先采用 PV 曲线是因为电力系统运行中，负荷大小通常以有功功率作为主要量化指标，且负荷节点普遍配置无功补偿装置（如 SVC、STATCOM），可动态调节功率因数至合理范围，使得无功平衡问题可通过设备调控得到缓解，而有功平衡更直接关联系统稳定性边界。PV 曲线因其对有功-电压耦合关系的直观表征，成为静态电压稳定分析的主流工具。

2.3 静态电压稳定评估指标

静态电压稳定指标的核心作用是量化评估电力系统当前运行状态与电压崩溃临界点之间的安全裕度。该领域经过长期研究已形成较为完善的理论体系，主要指标类型包括：基于连续潮流法计算的负荷功率极限裕度、电压稳定灵敏度指标、特征值/奇异值指标、临界点预测法、网络解耦法、局部电压稳定 L 指标。其中，局部电压稳定 L 指标（简称 L 指标）物理意义明确，能直接反映节点电压与网络参数的关联性，计算效率高，无需迭代求解复杂潮流方程，且结果归一化为无量纲值，便于跨系统对比，因此被广泛采用。

L 指标由瑞士学者 Kessel 率先提出^[101]，其理论构建基于电力系统节点电压方程，通过网络拓扑变换与矩阵降阶理论实现节点参数的解耦分析，最终导出归一化稳定性判据。该方法的优势包括解析性强、计算耗时短及结果可直接

横向对比，因而成为静态电压稳定评估的重要工具。

L 指标通过解耦网络方程，有效降低了大规模电网分析的复杂度，适用于新能源高渗透场景下的实时稳定性评估。L 指标中，电力系统节点按电气特性可分为两类：有源节点即为与发电机、负荷等功率源/汇设备相连，包括具有电压源特性的发电机节点和具有功率需求特性的负荷节点；无源节点为无功功率注入的纯联络节点。可建立电力网络的节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG}^{(0)} & Y_{GL}^{(0)} & Y_{GN}^{(0)} \\ Y_{LG}^{(0)} & Y_{LL}^{(0)} & Y_{LN}^{(0)} \\ Y_{NG}^{(0)} & Y_{NL}^{(0)} & Y_{NN}^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ U_L \\ U_N \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

式中 I_G 、 I_L —— 发电机节点和负荷节点的电流注入向量；

U_G 、 U_L 、 U_N —— 发电机、负荷和联络节点的电压向量；

$Y_{GG}^{(0)}$ 、 $Y_{GL}^{(0)}$ 、 $Y_{GN}^{(0)}$ 、 $Y_{LG}^{(0)}$ 、 $Y_{LL}^{(0)}$ 、 $Y_{LN}^{(0)}$ 、 $Y_{NG}^{(0)}$ 、 $Y_{NL}^{(0)}$ 、 $Y_{NN}^{(0)}$ —— 导纳矩阵的分块矩阵。

消去联络节点，可得

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ U_L \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

式中 Y_{GG} 、 Y_{GL} 、 Y_{LG} 、 Y_{LL} —— 消去联络节点后系统导纳矩阵的分块子矩阵。

$$\begin{cases} Y_{GG} = Y_{GG}^{(0)} - Y_{GN}^{(0)} (Y_{NN}^{(0)})^{-1} Y_{NG}^{(0)} \\ Y_{GL} = Y_{GL}^{(0)} - Y_{GN}^{(0)} (Y_{NN}^{(0)})^{-1} Y_{NL}^{(0)} \\ Y_{LG} = Y_{LG}^{(0)} - Y_{LN}^{(0)} (Y_{NN}^{(0)})^{-1} Y_{NG}^{(0)} \\ Y_{LL} = Y_{LL}^{(0)} - Y_{LN}^{(0)} (Y_{NN}^{(0)})^{-1} Y_{NL}^{(0)} \end{cases} \quad (2-7)$$

由式 (2-5) - (2-7) 可得，将联络节点消去的过程相当于在非联络节点间的分块到导纳矩阵处加入一个附加项，用来表征系统原网络里非联络节点通过联络节点之间的耦合关系。将 I_L 与 U_L 交换位置，定义负荷节点阻抗矩阵 $Z_{LL} = Y_{LL}^{-1}$ ，负荷节点的参与因子矩阵 $F_{LG} = -Y_{LL}^{-1} Y_{LG}$ ，式 (2-10) 可变换为

$$\begin{bmatrix} I_G \\ U_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} + Y_{GL} F_{GL} & Y_{GL} Z_{LL} \\ F_{LG} & Z_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_G \\ I_L \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

负荷节点 i 的电压 $U_{L,i}$ 计算方法为

$$U_{L,i} = \sum_{j \in N_G} F_{ij} U_{G,j} + \sum_{k \in N_L} Z_{ik} I_k \quad (2-9)$$

式中 N_G —— 发电机节点集合，含 PV 节点和平衡节点；

N_L —— 负荷节点集合；

F_{ij} 、 Z_{ik} —— 矩阵 F_{LG} 、 Z_{LL} 中对应元素；

$U_{G,j}$ ——发电机节点电压向量元素；

I_k ——负荷节点注入电流向量元素。

由式(2-9)的数学结构可知，负荷节点电压幅值可分为电源电压贡献项和电流阻抗耦合项两部分的线性叠加：电源电压贡献项是各发电机节点电压与其对应负荷节点的电压参与因子的加权和；电流阻抗耦合项是所有负荷节点注入电流与节点自阻抗、互阻抗的乘积之和。基于此，定义负荷节点的局部电压稳定指标，表表示流阻抗耦合项对节点电压的占比，即为

$$L_i = \left| \frac{\sum_{k \in N_L} Z_{ik} I_k}{\sum_{j \in N_G} F_{ij} U_{G,j} + \sum_{k \in N_L} Z_{ik} I_k} \right| = \left| 1 - \frac{\sum_{j \in N_G} F_{ij} U_{G,j}}{U_{L,i}} \right| \quad (2-10)$$

系统中负荷节点的集合可以构成向量 $L = [L_1, L_2, \dots, L_m], m \in N_L$ ，基于此，可定义静态电压稳定评估指标 L 为：

$$L = \max(L_1, L_2, \dots, L_m) = \|L\|_\infty \quad (2-11)$$

局部电压稳定指标 L 的数学特性决定了其取值范围为非负实数 (>0)，研究表明，该指标与系统 PV 曲线存在显著关联性，其演化趋势如图 2-5 所示。当 $L > 1$ 时，系统处于电压失稳状态；当 $L = 1$ 时，系统达到电压稳定临界点；当 $0 < L < 1$ 时，系统电压稳定，且 L 值越小，稳定性裕度越高。 L 指标通过量化电压稳定性与网络参数的关联，能够直接反映系统稳定状态，避免了传统方法（如连续潮流法绘制 PV 曲线）的复杂迭代计算。这一特性使其在在线监测和快速评估场景中具有显著实用价值， L 指标的提出为电压稳定性分析提供了一种解析化工具，尤其适用于高比例新能源电网的薄弱点快速辨识。

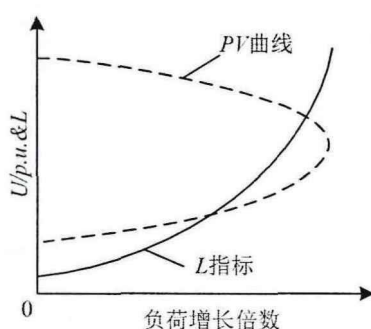


图 2-5 L 指标与 PV 曲线关系变化趋势

2.4 直流馈入的高比例新能源受端电网数学模型

2.4.1 受端电网基本结构

电力系统的运行特点可以通过建立微分方程和代数方程来表征，微分方程

描述系统元件的时变的动态特性，代数方程用来表征元件之间耦合关系及网络拓扑结构的静态特性。在对受端电网进行静态电压稳定分析时，只考虑静态过程，不计及元件动态特性，为了对静态电压稳定极限进行解析推导。

首先，搭建能够表征电网特征的数学模型。建立含直流的新能源受端电网基本结构，如图 2-6 所示。

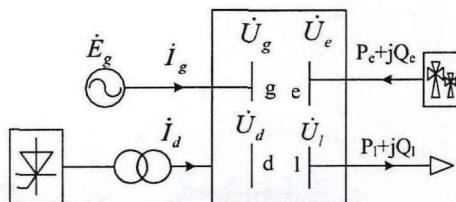


图 2-6 含直流的新能源受端电网结构

将常规交流同步发电机组、直流线路(为简化分析,本文直流线路特指 LCC 直流)、新能源以及负荷等效简化为单端口,各节点都为同类节点等效集合。

2.4.2 常规交流机组和直流节点等效

常规同步交流发电机组节点用 g 表示, $U_g \angle \theta_g$ 为同步机组母线电压,空载电动势用 $E_g \angle \theta_e$ 表示,交流机组和电网之间通过暂态电抗 x_d' 连接, δ 表示交流机组功角,且 $\delta = \theta_e - \theta_g$,交流机组通过节点注入系统的电流为 i_g , i_g 可表示为

$$i_g = \frac{\dot{E}_g - \dot{U}_g}{jx_d'} \approx \frac{U_N}{x_d'} \angle (\delta - \frac{\pi}{2}) \quad (2-12)$$

电网正常运行状态下,母线电压与空载电势大小在额定电压周围波动不大,可对上式进行简化处理。

式中 d ——直流逆变站换流变网侧节点;

$U_d \angle \theta_d$ ——直流母线电压。

通过 LCC-HVDC 运行特性分析对直流逆变站模型进行等效简化分析,直流逆变器静态方程如下所示:

$$\begin{cases} U_{dc} = \frac{3n}{\pi} \left[k(\sqrt{2}U_d) \cos \beta + XI_{dc} \right] \\ I_{dc} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}v \frac{1}{nk} (\sqrt{2}I_d)} \\ \arg \left(\frac{\dot{U}_d}{\dot{I}_d} \right) = -\cos^{-1}(v \cos \beta) = \delta \in [-\frac{\pi}{2}, 0] \end{cases} \quad (2-13)$$

式中 U_{dc} 、 I_{dc} ——直流并网节点电压和电流;

U_d 、 I_d ——换流变网侧节点 d 的交流电压和电流有效值；

n ——多重化逆变器桥数，对于 m 脉动逆变器 $n=m/6$ ；

k ——换流器变比；

β ——逆变器熄弧角；

X ——换相电抗；

v ——电流基波因数， $v=I_d^{(1)}/I_d$ ，对于 6 脉动 $v=0.955$ ，12 脉动 $v=0.9886$ 。

基于上式中 $\delta < 0$ 可看出，如果不考虑对换流器进行无功补偿，直流逆变站在常规运行方式下可被当作无功电源，向受端电网发出无功功率，根据式（2-2）可得：

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{2}nk}{\pi} U_h \cos \beta + \frac{\sqrt{6}v}{2k} XI_h \quad (2-14)$$

将式（1.3）左右两边同时乘换流变网侧节点 d 电压相角 θ_d 对应的旋转因子 $e^{j\theta_d}$ ，可得：

$$U_{dc} e^{j\theta_d} = \frac{3\sqrt{2}nk}{\pi} U_h e^{j\theta_d} \cos \beta + \frac{\sqrt{6}v}{2k} XI_h e^{j(\theta_d - \delta)} e^{j\delta} \quad (2-15)$$

可得

$$\dot{U}_d = \frac{\sqrt{2}\pi}{6nk \cos \beta} U_{dc} e^{j\theta_d} - \frac{\sqrt{3}\pi v}{6nk^2 \cos \beta} X e^{j\delta} \dot{I}_d = \dot{E}_d - z_d \dot{I}_d \quad (2-16)$$

式中： $\dot{E}_d$ 为直流等效电动势， z_d 为直流等效电抗。

采用 12 脉动（ $n=2$ ），为简化分析处理，认为 $v=1, k=1, \delta=-\beta$ ，则可得：

$$\begin{cases} \dot{E}_d = E_d e^{j\theta_d} = \frac{\sqrt{2}\pi U_{dc}}{12 \cos \beta} e^{j\theta_d} \\ z_d \approx |z_d| e^{j\theta_d} = \frac{\sqrt{3}\pi}{12 \cos \beta} X e^{-j\beta} \end{cases} \quad (2-17)$$

由式（2-6）可得，直流逆变站可以通过带阻抗的交流电压源静态等效电路表示，可以将馈入受端电网的直流线路进行简化处理，方便后续分析计算。

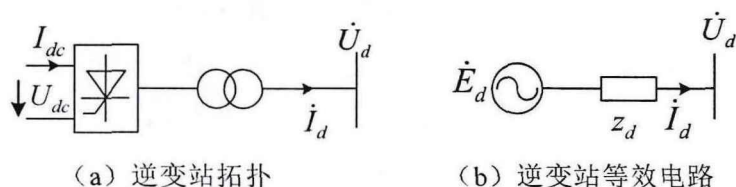


图 2-7 直流逆变站的等效过程

2.4.3 新能源并网节点和负荷节点等效

新能源并入受端电网的节点为 e ， $U_e \angle \theta_e$ 为新能源并网点母线电压。由于风电、光伏等新能源并网运行时通常通过最大功率点跟踪控制技术的情况下，只

要电网电压与标准额定值相差不大，新能源输出功率主要受风速、光照强度、气温等因素影响，新能源并网点运行参数波动几乎不会影响运行电压，因此，可以将并网新能源系统视为具有恒定导纳特性的等效系统，可表示为：

$$Y_e = -\frac{S_e^*}{U_e^2} = -\frac{P_e - jQ_e}{U_e^2} \approx -\frac{P_e - jQ_e}{U_N^2} \quad (2-18)$$

式中： $\dot{S}_e = P_e + jQ_e$ 为新能源注入并网点的视在功率。

本文含直流馈入的新能源并网受端电网场景下新能源渗透率定义为新能源并网容量与电网额定容量的比值。设新能源有功功率为 P_e ，负荷有功功率为 P_l ，渗透率为 η ，定义 $P_e = \eta P_l$ 。

并网逆变器设计时预留了较大的功率余量，以便在紧急情况为系统提供必要的功率支持，确保新能源并网系统的稳定运行。在常规运行状态下，通常设定无功控制指令为零，因此在后续的分析中，可以假设新能源无功输出 $Q_e = 0$ 。

2.4.4 受端电网简化模型建立

通过对并入受端电网的各元件进行简化处理，可将同步交流电机、新能源、直流、负荷节点进行等效，节点 g 、 d 可看做有阻抗的交流电压源，节点 e 、 l 可看做恒导纳接地。为分析含直流馈入的新能源并网系统静态电压稳定，首先列写受端电网节点电压方程。

$$\begin{bmatrix} Y_{ll} + y_l & Y_{lg} & Y_{ld} & Y_{le} \\ Y_{gl} & Y_{gg} & Y_{gd} & Y_{ge} \\ Y_{dl} & Y_{dg} & Y_{dd} + y_d & Y_{de} \\ Y_{el} & Y_{eg} & Y_{ed} & Y_{ee} + y_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_l \\ U_g \\ U_d \\ U_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_g \\ y_d E_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

为简化后续分析计算，对部分物理量进行如下假设：

(1) 上述公式中，互导纳 Y_{ij} 仅针对输电线路，由于本文所分析的各类节点均通过高压输电线路相连，因此可以忽略线路电阻，由于线路互电纳很小，对于计算中出现的三次和四次乘积项也可忽略；由于节点阻抗矩阵具有对角占优性，计算时不对自导纳 Y_{ii} 与自阻抗 Z_{ii} 做简化处理。

(2) 在计算中，为了尽量使系统接近于静态稳定极限状态，常规交流发电机组功角 $\delta = \pi/2$ ，此时根据式(2-12)可得 $\dot{I}_g = y_g U_N = U_N / x_d'$ 。

(3) 假设直流逆变站节点电压与同步机电动势具有相同相角。

2.5 电压稳定临界条件推导

应用 L 指标判断系统稳定性时，将电网中的节点分为两大类，分别为负荷节点 l 和发电机节点 g ，对图2-6所示的含直流和新能源等多种类型节点的系统

(除负荷节点外, 节点数为 $n-1$), 用 g 表示电源节点集合 ($n=4$), 系统节点电压方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} Y_{ll} & (Y_{lg})_{1 \times (n-1)} \\ (Y_{gl})_{(n-1) \times 1} & (Y_{gg})_{(n-1) \times (n-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_l \\ (\dot{U}_g)_{(n-1) \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_l \\ (\dot{I}_g)_{(n-1) \times 1} \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

由式 (2-20) 可以得到

$$\dot{U}_l = \frac{\dot{I}_l}{Y_{ll}} - \frac{Y_{lg} \dot{U}_g}{Y_{ll}} \quad (2-21)$$

L 指标定义为式 (2-21) 等号右侧第一项与负荷电压相量比的模值, 即为:

$$L = \left| \frac{\dot{I}_l}{Y_{ll} \dot{U}_l} \right| \quad (2-22)$$

当负荷节点电压失稳时, 其对应的 L 指标数值将超过阈值 1.0。对于含多负荷节点的受端电网, 若任意负荷母线失稳, 均可能引发全网电压崩溃。 L 指标的临界值 $L=1.0$ 需通过潮流计算确定, 但直接求解计算复杂度高, 为便于解析分析, 需推导与 $L=1.0$ 等价的简化临界条件。根据式 (2-20) 可得:

$$\dot{U}_l = (Y_{ll} - Y_{lg}(Y_{gg})^{-1}Y_{gl})(\dot{I}_l - Y_{lg}(Y_{gg})^{-1}\dot{I}_g) \quad (2-23)$$

假设所有负荷节点间的电气距离极近 (视为强耦合等效节点), 则当任一负荷节点电压崩溃时, 其余负荷节点的 L 指标均趋近于 1.0。此假设的物理意义为将全网负荷节点等效为单一节点 (记为节点 1), 其 L 指标达到 1.0 即为系统崩溃临界点。将式 (2-23) 代入式 (2-22), 并令 $L=1.0$, 可得

$$\frac{|\dot{I}_l|}{|Y_{ll}|} = \frac{|\dot{I}_l - Y_{lg}(Y_{gg})^{-1}\dot{I}_g|}{|Y_{ll} - Y_{lg}(Y_{gg})^{-1}Y_{gl}|} \quad (2-24)$$

由式 (2-24) 化简可得到

$$Y_{lg}(Y_{gg})^{-1}(Y_{ll}\dot{I}_g - Y_{gl}\dot{I}_l) = 0 \quad (2-25)$$

式 (2-25) 所示的等效临界条件涉及 $n-1$ 阶矩阵求逆, 解析计算仍较复杂。因此, 通过节点消去法对网络进行降阶处理, 消去所有中间节点, 仅保留 1 个等效发电机节点和 1 个等效负荷节点, 原系统计算复杂度从 $n-1$ 阶矩阵求逆 (如 4 节点系统需 3 阶求逆) 降低至 $n-2$ 阶 (如 4 节点系统简化为 2 阶), 最终临界条件化为式 (2-26)。

$$Y_{ll}'\dot{I}_g' = Y_{gl}'\dot{I}_l' \quad (2-26)$$

将负荷节点等效为强耦合负荷节点可反映实际电网中区域负荷的集群效应, 适用于城市电网等高密度负荷场景, 通过拓扑简化, 将复杂矩阵运算转化为低阶解析式, 可显著降低计算资源需求, 适用于在线快速评估。

2.6 新能源极限渗透率分析计算

在受端电网电压稳定分析中, 新能源极限渗透率 λ 定义为: 当新能源并网容量增至临界值时, 负荷节点 l 的电压达到静态稳定边界 (即 $L=1.0$), 此时新能源功率占总负荷的比例即为系统可承载的渗透率上限, 该参数直接反映了高比例新能源场景下电网的电压稳定极限。首先将式 (2-19) 所示的系统节点电压方程按发电机节点与负荷节点进行矩阵分块。

$$\begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{lg} \\ \dot{U}_{ed} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{lg} \\ \dot{I}_{ed} \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

其中, $\dot{U}_{lg} = [\dot{U}_l \quad \dot{U}_g]^T$, $\dot{U}_{ed} = [\dot{U}_e \quad \dot{U}_d]^T$, $\dot{I}_{lg} = [0 \quad U_N/x_d']^T$, $\dot{I}_{ed} = [0 \quad y_h E_h]^T$ 。

将式 (2-27) 进行节点消去, 仅将节点 l 和节点 g 保留, 可得:

$$(Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C) \dot{U}_{lg} = \dot{I}_{lg} - Y_B Y_D^{-1} \dot{I}_{ed} \Rightarrow Y'_{lg} \dot{U}_{lg} = \dot{I}'_{lg} \quad (2-28)$$

式中,

$$Y'_{lg} = \begin{bmatrix} Y'_{ll} & Y'_{lg} \\ Y'_{gl} & Y'_{gg} \end{bmatrix}, \dot{I}'_{lg} = [\dot{I}'_l \quad \dot{I}'_g]^T \quad (2-29)$$

在节点导纳矩阵的求逆过程中, 利用其对角占优特性 (即对角元素模值显著大于非对角元素), 可忽略非对角元素的耦合影响, 近似得到矩阵逆的简化表达式, 并且由于 $y_d \gg |Y_{dl}|$, $(Y_{dd} + y_d)^{-1} \approx z_d$, 可以得到 $Y_D^{-1} \approx \text{diag}[U_N^2 / (Y_{ee} U_N^2 - \lambda P_l), z_d]$,

与式 (2-20) 联立求解, 可得:

$$\begin{cases} Y'_{ll} = \left(G_{ll} + \frac{P_l}{U_N^2} \right) + \frac{B_{le} B_{el} U_N^2}{Y_{ee} U_N^2 - \lambda P_l} + j \left(B_{ll} - \frac{Q_l}{U_N^2} \right) + B_{ld} B_{dl} z_d \\ \dot{I}'_g = \frac{U_N}{x_d} - j B_{gd} E_d \\ Y'_{gl} = \frac{B_{ge} B_{el} U_N^2}{Y_{ee} U_N^2 - \lambda P_l} + j B_{gl} + B_{gd} B_{dl} z_d \\ \dot{I}'_l = -j B_{ld} E_d \end{cases} \quad (2-30)$$

结合式 (2-27), 对式 (2-30) 进行化简, 对网络方程两端取实部, 结合直流馈入功率约束, 可推导出高比例新能源受端电网的静态电压临界稳定对应的新能源极限渗透率 $\lambda_{\max}$ 。

$$\lambda_{\max} = \frac{B_{el} B_{le} U_N^5}{P_l (r^2 + s^2)} r + \frac{G_{ee} U_N^2}{P_l} \quad (2-31)$$

式中, r 、 s 满足:

$$\begin{cases} r = G_{ll} U_N^3 + P_l U_N + (B_{ll} B_{gd} U_N^2 - B_{ld} B_{gl} U_N^2 - Q_l B_{gd}) E_d x_d' + B_{dl} B_{ld} |z_h| \cos \beta U_N^3 \\ s = B_{ll} U_N^3 - Q_l U_N - (G_{ll} B_{gd} U_N^2 + P_l B_{gd}) E_d x_d' - B_{dl} B_{ld} |z_h| \sin \beta U_N^3 \end{cases} \quad (2-32)$$

式(2-31)给出的极限渗透率存在保守性,其理论假设为所有负荷节点的L指标同时达到1.0(即全系统同步失稳),而实际负荷分布通常较为分散,此类极端工况发生概率极低。系统新能源渗透率达到极限的情况下,新能源并网容量为:

$$P_e = \lambda_{\max} P_l = \mu B_{le} B_{el} U_N^5 + G_{ee} U_N^2 \quad (2-33)$$

其中, $\mu = \frac{1}{r+s^2/r}$, 当r变化时, P_e 随之发生变化,因此 P_e 存在极大值,

当 $r=-s$ 时, P_e 取到极值为:

$$P_{e\max} = \frac{B_{el} B_{le} U_N^5}{2r} + G_{ee} U_N^2 \quad (2-34)$$

需说明的是,上述临界条件对应负荷节点的有功功率处于较高运行水平,根据理论分析,此时负荷有功功率P的数值已趋近于节点的短路容量。然而,实际电力系统中,由于短路容量通常远超常规负荷设计上限,持续高功率运行将导致设备过热或绝缘损坏,并且为此类极端工况配置冗余设备将大幅增加投资成本,因此负荷功率长期维持在接近短路容量的工况通常很难实现,工程实践中需结合设备耐受能力与安全裕度进行对理论值进行修正。

2.7 仿真验证

基于 PSASP 平台搭建含直流和新能源的仿真模型,拓扑结构如图 2-8 所示。通过小扰动后电压稳定性测试,研究直流馈入对系统新能源极限渗透率的影响规律。

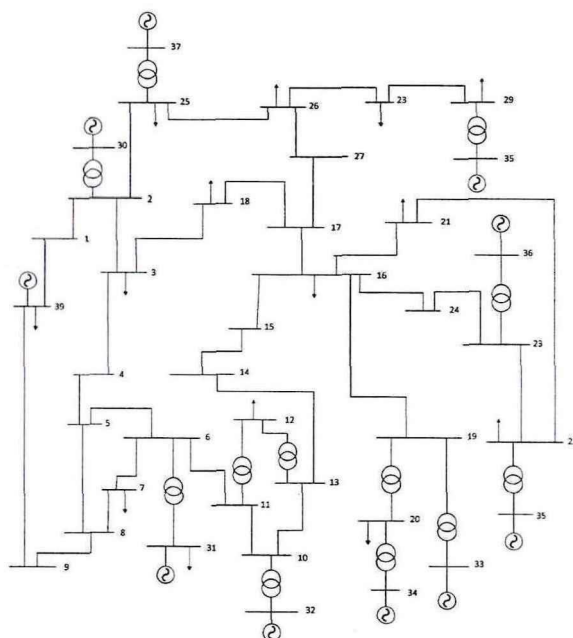


图 2-8 含直流馈入的新能源并网系统仿真图

2.7.1 新能源极限渗透率计算

利用实际仿真参数进行含直流馈入的新能源受端电网的新能源极限渗透率计算，具体参数设置如表 2-1。

表 2-1 交流、直流线路及负荷参数设置

参数	物理量	数值
线路单位阻抗	$R+jX$	$(0.02+j0.28)\Omega/\text{km}$
线路长度	l	200km
额定电压	U_N	220kV
负荷功率	P_l+jQ_l	$(800+500)\text{MVA}$
运行方式	/	双极运行
直流运行电压	U_d	345kV
直流运行功率	P_d	150MW
熄弧角	α	15

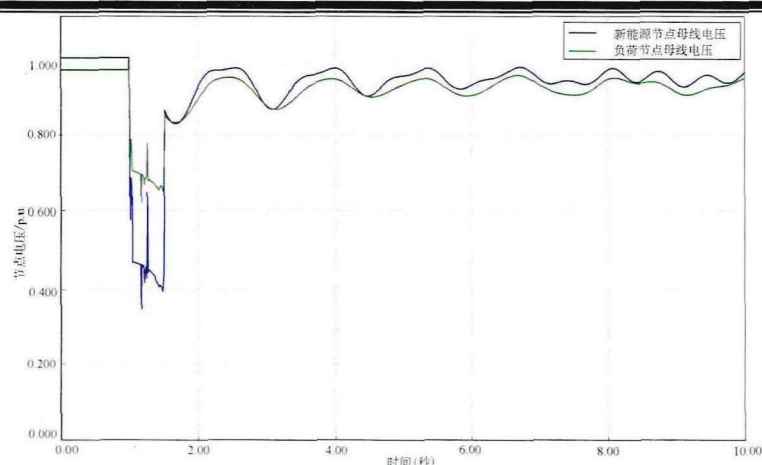
根据式 (2-17) (2-31) (2-32) 可计算得到直流馈入后系统新能源极限渗透率，公式为

$$\lambda_{\max} = \frac{rU_N^5}{P_l(r^2+s^2)l^2x^2} + \frac{3RU_N^2}{(R^2+X^2)lP_l} \quad (2-35)$$

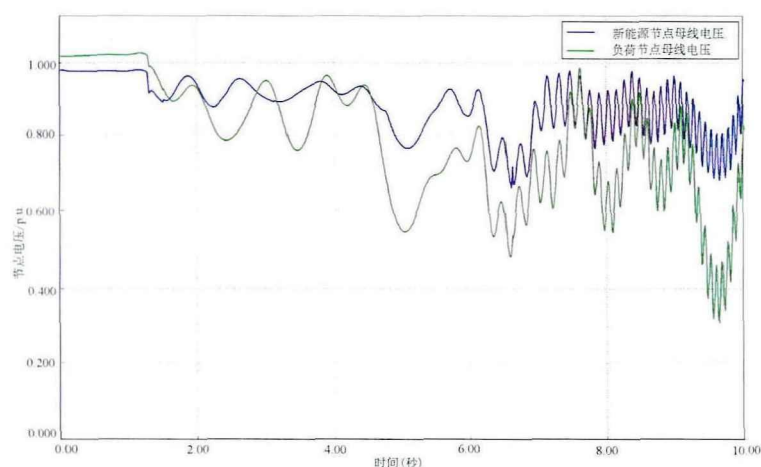
将具体数值代入式 (2-35) 计算可得新能源极限渗透率 $\lambda_{\max}$ 为 23.1%。

2.7.2 新能源渗透率对系统稳定性的影响

设定新能源初始渗透率为固定值，待系统稳定运行 1 秒后突增新能源并网容量 20 MW，改变新能源并网容量，观察不同新能源渗透率下新能源节点和负荷节点电压动态变化曲线。图 2-9 (a) 为渗透率为 18.5% 时各节点电压变化曲线，图 2-9 (b) 为渗透率为 20.3% 时各节点电压变化曲线。



(a)

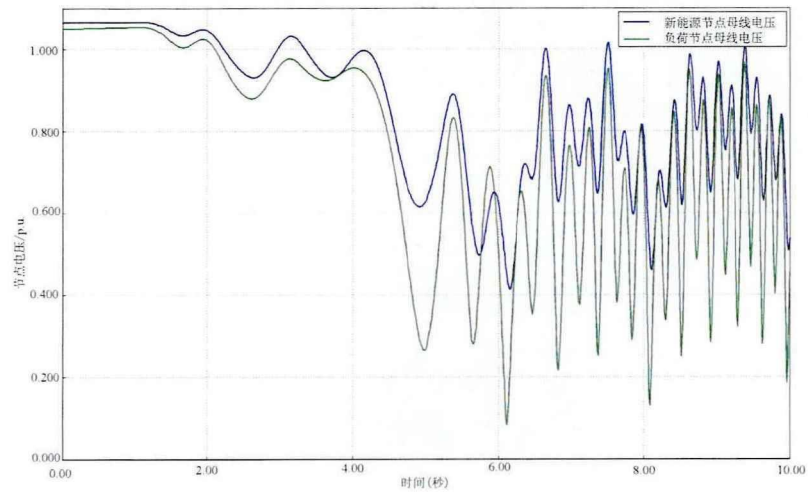


(b)

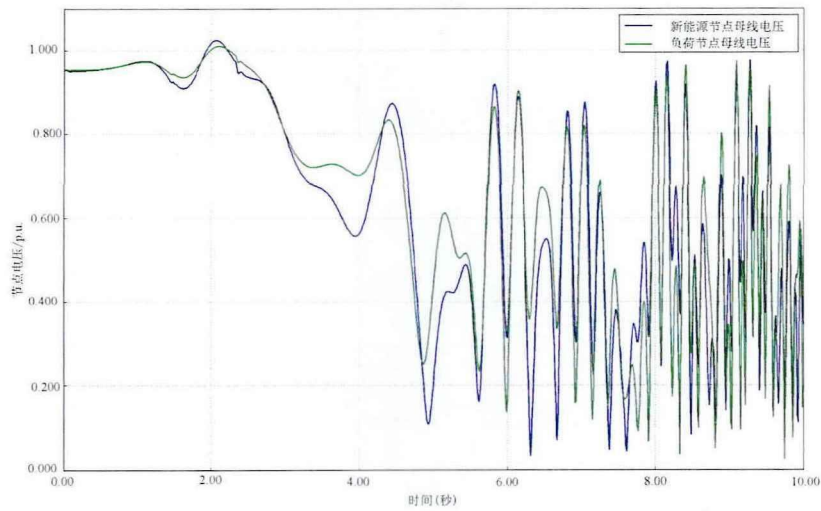
图 2-9 含直流馈入受端电网受小扰动后电压变化曲线

实验结果表明,当渗透率为 18.5%时系统维持稳定运行,当渗透率达到 20.3%后,节点电压呈现低阻尼特性,经低频振荡后迅速失稳。由此确定系统临界渗透率区间为 $[0.185,0.203]$,比计算值偏小约 3%。

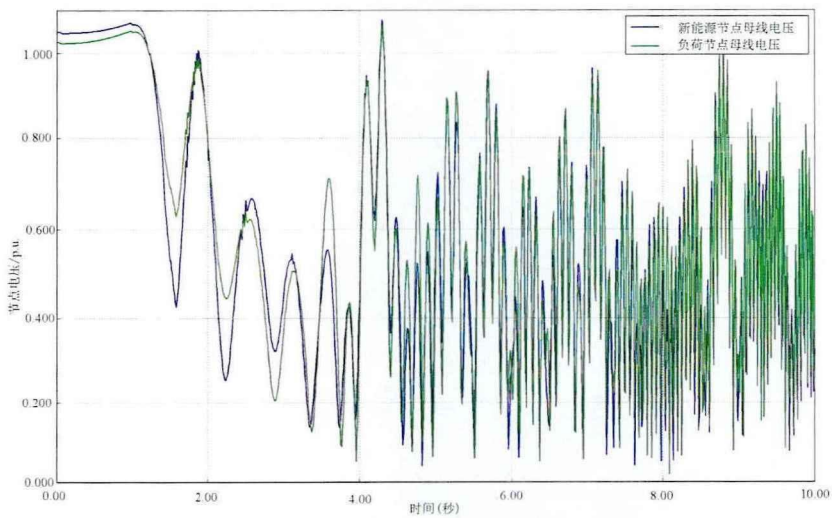
继续增加新能源并网容量,随着新能源渗透率增大,系统电压变化曲线如图 2-10 所示。分析发现,随着渗透率上升,低频振荡周期缩短且振荡幅值增大 30%-50%,失稳时间缩短。



(a)



(b)

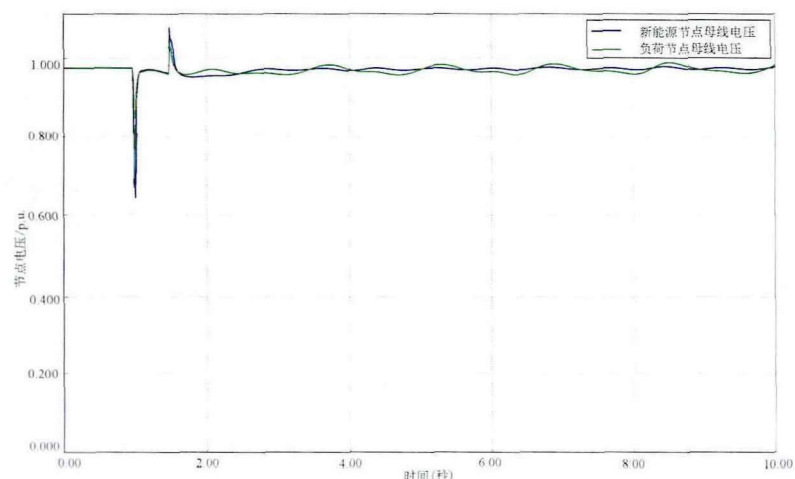


(c)

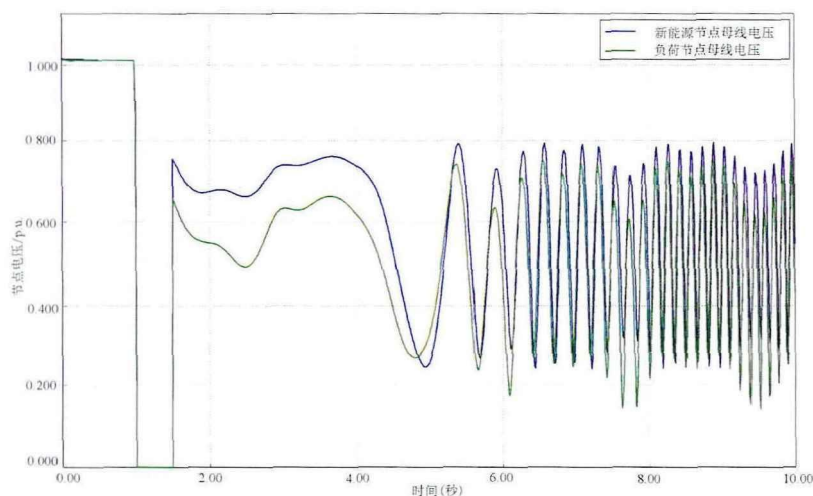
图 2-10 渗透率持续增加时含直流馈入受端电网受小扰动后电压变化曲线

2.7.3 直流馈入新能源极限渗透率的影响

为研究直流馈入对系统稳定性的影响，将直流逆变站与系统解列后重复实验，新能源及负荷节点的仿真结果如图 2-11 所示，图(a)新能源渗透率为 38.5，图 (b) 新能源渗透率为 40%。图 2-11 表明，在无直流馈入条件下，渗透率提升至 38.5%时系统仍保持稳定，而渗透率达 40%时发生电压失稳。



(a)



(b)

图 2-11 直流未馈入时受端电网受小扰动后电压变化曲线

对比实验表明，直流馈入使新能源极限渗透率降低约 7.5%-8%，验证了前文理论分析的准确性。此外，电压失稳模式发生显著变化，直流馈入场景下表现为低频振荡失稳，而无直流馈入时则呈现典型无功支撑不足导致的非振荡型失稳，进一步揭示了不同运行模式下电压崩溃的物理机制差异。

2.8 本章小结

本章围绕含直流馈入的高比例新能源受端电网的静态电压稳定性问题展开研究。首先从电力系统静态电压稳定机理出发，基于能够表征局部电压稳定特性的 L 指标，通过对直流输电系统、新能源发电单元及负荷进行等效建模，构建了含直流馈入的新能源受端电网简化模型。在此基础上，基于静态电压稳定判据推导了新能源极限渗透率的解析表达式，并根据仿真系统数据计算该系统新能源临界渗透率。最后通过仿真验证了新能源渗透率对系统稳定性的影响，以及直流馈入对新能源极限渗透率的影响，直流线路馈入会削弱系统电压支撑能力，导致新能源极限渗透率下降。本章研究为含直流馈入受端电网的新能源接纳能力评估提供了理论依据，也为后续章节的薄弱节点辨识奠定了分析基础。

第3章 含直流馈入的新能源并网受端系统强弱评估

3.1 引言

随着电力系统中直流输电和新能源发电技术的大规模应用,电网结构和运行特性发生了显著变化,直流输电和风电、光伏等新能源并网比例的不断增加,往往依赖具有显著不确定性和波动特征的电力电子装置完成连接,这对电力网络的稳定运行造成了显著冲击,随着清洁能源在电网中的占比不断提升,系统对电压的支撑能力呈现逐步下降的趋势,使得电力系统稳定性面临新的挑战。作为一种兼具直观性和简便性的静态分析方法,短路比在电力网络稳定性分析及系统规划领域具有重要意义。

传统的短路比指标主要针对交流系统设计,难以准确反映直流及新能源并网系统的稳定性特性。因此,亟需提出一种科学完善的短路比指标,以评估直流及新能源并网系统的稳定性,并为电网规划和运行提供理论支持。本章基于叠加定理,提出了一种新的新能源并网点短路比定义,该定义充分考虑了新能源场站之间的相互影响以及直流线路对系统稳定性的影响。通过对该定义的深入分析,本章进一步推导了临界短路比的理论表达式,对含直流馈入的新能源并网系统的强弱评估提供了新的理论依据。本章研究成果不仅丰富了短路比理论体系,还为电力系统的安全稳定运行提供了重要参考。

3.2 含直流馈入的新能源并网系统等效分析

3.2.1 系统等效分析

对于含直流馈入的新能源并网系统,直流和新能源的接入均会导致交流系统节点电压发生变化,系统的稳定性也会因此改变。依据叠加定理,综合考虑直流及新能源并网对交流系统的影响,可将系统等效为三个部分的叠加。

系统节点电压方程为:

$$U = U_{ac} + \Delta U_e + \Delta U_d = Z(I_{ac} + I_e + I_d) \quad (3-1)$$

式中 Z —— 节点阻抗矩阵;

U —— 电压列向量;

U_{ac} —— 直流与新能源并网前交流系统节点电压;

ΔU_e —— 新能源并网引起的节点电压变化量;

ΔU_d —— 直流馈入引起的节点电压变化量;

I_{ac} —— 直流与新能源并网前同步机注入电流；

I_e —— 新能源机组注入电流；

I_d —— 直流线路注入电流。

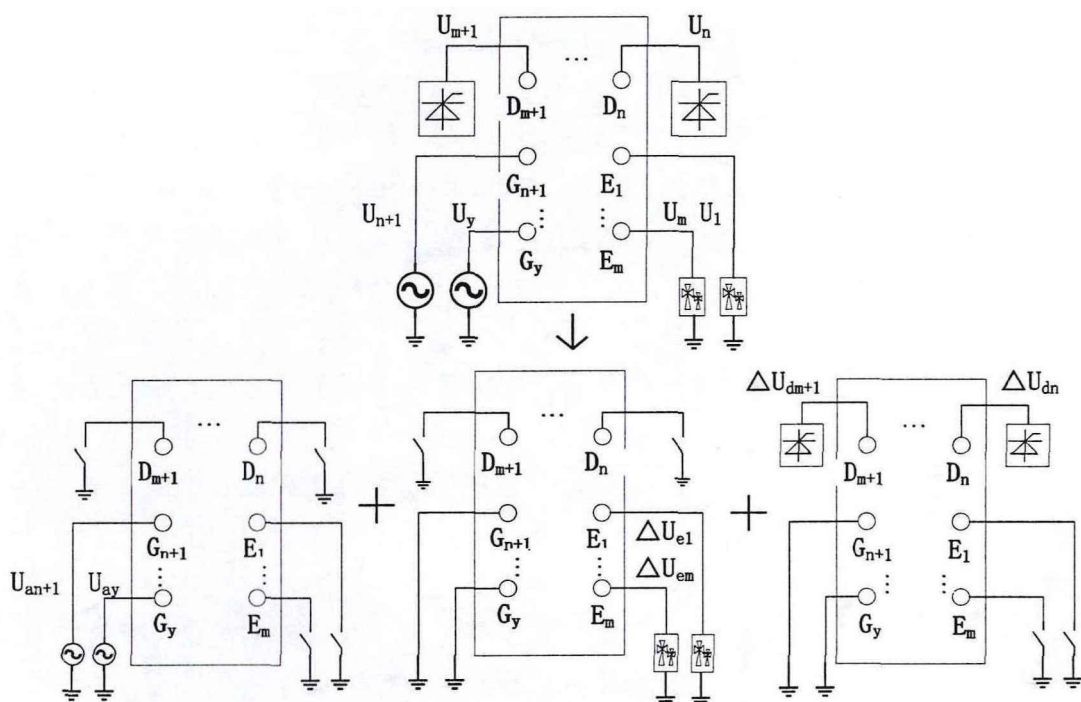


图 3-1 含直流馈入的新能源并网系统等效分析模型

3.2.2 交流系统短路容量

在含直流馈入及新能源并网的交流系统中，节点 1-m 为新能源并网节点，节点 m+1-n 为直流馈入节点，n+1-y 为同步机节点。在求交流系统短路容量时，不考虑直流及新能源注入电流的影响，只考虑同步机节点注入电流。

各同步机节点注入交流系统的电流分别为 $\dot{I}_{acn+1}, \dot{I}_{acn+2}, \dots, \dot{I}_{acy}$ ，系统节点电压方程为：

$$U_{ac} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1m} & \dot{Z}_{1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{1n} & \dot{Z}_{1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mm} & \dot{Z}_{mm+1} & \cdots & \dot{Z}_{mn} & \dot{Z}_{mn+1} & \cdots & \dot{Z}_{ny} \\ \dot{Z}_{m+11} & \cdots & \dot{Z}_{m+1m} & \dot{Z}_{m+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1n} & \dot{Z}_{m+1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{n1} & \cdots & \dot{Z}_{nm} & \dot{Z}_{nm+1} & \cdots & \dot{Z}_{nn} & \dot{Z}_{nn+1} & \cdots & \dot{Z}_{ny} \\ \dot{Z}_{n+11} & \cdots & \dot{Z}_{n+1m} & \dot{Z}_{n+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{n+1n} & \dot{Z}_{n+1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{n+1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{y1} & \cdots & \dot{Z}_{ym} & \dot{Z}_{ym+1} & \cdots & \dot{Z}_{yn} & \dot{Z}_{yn+1} & \cdots & \dot{Z}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dot{I}_{acn+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{acy} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

含直流馈入的新能源并网系统等值阻抗矩阵中，对角元素 $\dot{Z}_{ii}$ 为节点 i 的自阻抗，表示节点 i 的折算等值阻抗；非对角元素 $\dot{Z}_{ij}$ 为节点 i 和节点 j 之间的互阻抗，表示节点 i 、 j 之间的等值阻抗。

用新能源并网前并网点 i 的开路电压表示该点的交流系统电势。

$$\dot{U}_{aci} = \dot{E}_{eqi} \quad (3-3)$$

新能源机组并网前的短路电流为：

$$\dot{I}_{aci} = \frac{\dot{U}_{aci}}{\dot{Z}_{ii}} = \frac{\dot{E}_{eqi}}{\dot{Z}_{ii}} \quad (3-4)$$

从新能源并网点 i 看向交流系统得到的短路容量为：

$$\dot{S}_{aci} = \dot{I}_{aci} U_N = \frac{\dot{E}_{eqi} U_N}{\dot{Z}_{ii}} \quad (3-5)$$

交流系统的短路容量可以反映交流系统的稳定性及系统强弱，系统越强，说明系统对于短路电流具有较高的承受能力，具有较强的抗扰动能力，能够在面对外部干扰或故障时保持稳定运行。因此，在设计和运行新能源并网系统时，需要重视交流系统短路容量的计算，以确保系统的稳定性和可靠性。

3.2.3 新能源等效并网容量

在计算新能源机组的等效并网容量时，不考虑馈入直流及交流系统的注入电流，只考虑新能源并网点 $1-m$ 的注入电流，各新能源机组注入交流系统的电流分别为 $\dot{I}_{e1}, \dot{I}_{e2}, \dots, \dot{I}_{em}$ 。节点电压方程为

$$\Delta U_e = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1m} & \dot{Z}_{1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{1n} & \dot{Z}_{1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mm} & \dot{Z}_{mm+1} & \cdots & \dot{Z}_{mn} & \dot{Z}_{mn+1} & \cdots & \dot{Z}_{my} \\ \dot{Z}_{m+11} & \cdots & \dot{Z}_{m+1m} & \dot{Z}_{m+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1n} & \dot{Z}_{m+1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{n1} & \cdots & \dot{Z}_{nm} & \dot{Z}_{nm+1} & \cdots & \dot{Z}_{nn} & \dot{Z}_{nn+1} & \cdots & \dot{Z}_{ny} \\ \dot{Z}_{n+11} & \cdots & \dot{Z}_{n+1m} & \dot{Z}_{n+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{n+1n} & \dot{Z}_{n+1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{n+1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{y1} & \cdots & \dot{Z}_{ym} & \dot{Z}_{ym+1} & \cdots & \dot{Z}_{yn} & \dot{Z}_{yn+1} & \cdots & \dot{Z}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{e1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{em} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

计算新能源等效并网容量时，当新能源机组并网点与同步机组的电气距离较远时，可忽略新能源机组的注入电流对同步机组的影响，同时忽略新能源机组对直流的影响。在此基础上，可以对上述节点电压方程进行简化处理，简化后的方程为：

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_i \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1i} & \cdots & \dot{Z}_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{i1} & \cdots & \dot{Z}_{ii} & \cdots & \dot{Z}_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mi} & \cdots & \dot{Z}_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{e1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{ei} \\ \vdots \\ \dot{I}_{em} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

其他新能源机组对新能源并网点 i 影响下的新能源并网点 i 的电压变化量为：

$$\Delta \dot{U}_{ei} = \dot{Z}_{ii} \dot{I}_{ei} + \sum_{j=1, j \neq i}^m \dot{Z}_{ij} \dot{I}_{ej} \quad (3-8)$$

新能源并网点 i 的等效并网容量为：

$$\dot{S}_{eqi} = \dot{U}_i \dot{I}_{eqi}^* = \dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_j} \dot{S}_j \quad (3-9)$$

新能源等效并网容量反映了新能源各并网点之间的相互影响，反映了新能源发电单元与电网之间的交互能力，也受到电网稳定性和传输能力的限制，因此需要通过精确计算来确保系统的安全运行。

3.2.4 等效直流输送功率

多馈入直流线路并网也会引起系统节点电压波动，在计算等效直流输送功率时，不考虑同步机组与新能源机组的注入电流。直流线路并网点 $m+1-n$ 的外部注入电流分别为 $\dot{I}_{dm+1}, \dot{I}_{dm+2}, \cdots, \dot{I}_{dn}$ ，节点电压方程为：

$$\Delta U_d = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1m} & \dot{Z}_{1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{1n} & \dot{Z}_{1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mm} & \dot{Z}_{mm+1} & \cdots & \dot{Z}_{mn} & \dot{Z}_{mn+1} & \cdots & \dot{Z}_{my} \\ \dot{Z}_{m+11} & \cdots & \dot{Z}_{m+1m} & \dot{Z}_{m+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1n} & \dot{Z}_{m+1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{n1} & \cdots & \dot{Z}_{nm} & \dot{Z}_{nm+1} & \cdots & \dot{Z}_{nn} & \dot{Z}_{nn+1} & \cdots & \dot{Z}_{ny} \\ \dot{Z}_{n+11} & \cdots & \dot{Z}_{n+1m} & \dot{Z}_{n+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{n+1n} & \dot{Z}_{n+1n+1} & \cdots & \dot{Z}_{n+1y} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{y1} & \cdots & \dot{Z}_{ym} & \dot{Z}_{ym+1} & \cdots & \dot{Z}_{yn} & \dot{Z}_{yn+1} & \cdots & \dot{Z}_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dot{I}_{dm+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{dn} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

计算等效直流输送功率时，当直流并网点与同步机组的电气距离较远时，可忽略多馈入直流的注入电流对同步机组的影响，但是直流并网对新能源机组的影响会导致新能源并网点 i 电压发生变化，不可忽略。在此基础上，可以对上述节点电压方程进行简化处理，简化后的方程为：

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_i \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_m \\ \Delta \dot{U}_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1i} & \cdots & \dot{Z}_{1m} & \dot{Z}_{1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{i1} & \cdots & \dot{Z}_{ii} & \cdots & \dot{Z}_{im} & \dot{Z}_{im+1} & \cdots & \dot{Z}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mi} & \cdots & \dot{Z}_{mm} & \dot{Z}_{mm+1} & \cdots & \dot{Z}_{mn} \\ \dot{Z}_{m+11} & \cdots & \dot{Z}_{m+1i} & \cdots & \dot{Z}_{m+1m} & \dot{Z}_{m+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{n1} & \cdots & \dot{Z}_{ni} & \cdots & \dot{Z}_{nm} & \dot{Z}_{nm+1} & \cdots & \dot{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dot{I}_{dm+1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{dn} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

馈入直流线路对新能源并网点影响下的新能源并网点 i 的电压变化量为：

$$\Delta \dot{U}_{di} = \dot{Z}_{im+1} \dot{I}_{dm+1} + \dot{Z}_{im+2} \dot{I}_{dm+2} + \cdots + \dot{Z}_{in} \dot{I}_{dn} = \sum_{k=m+1}^n \dot{Z}_{ik} \dot{I}_{dk} \quad (3-12)$$

等效直流输送功率为：

$$P_{deq} = \sum_{k=m+1}^n \frac{\dot{Z}_{ik}^* \dot{U}_i}{\dot{Z}_{ii}^* \dot{U}_k} P_k \quad (3-13)$$

3.3 含直流馈入的新能源并网点短路比指标

3.3.1 新能源并网点短路比指标

综上，含直流馈入的新能源并网系统短路比指标定义为：

$$EDSCR_i = \frac{S_{aci}}{S_{eqi} + P_{deq}} = \frac{\left| \frac{U_N E_{eqi}}{Z_{ii}} \right|}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_j} \dot{S}_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{\dot{Z}_{ik}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_k} P_k \right|} \quad (3-14)$$

若进一步考虑 $|\dot{U}_i| = |\dot{U}_j| = |\dot{U}_k| = 1$ ，则有

$$EDSCR_i = \frac{\left| \frac{U_N E_{eqi}}{Z_{ii}} \right|}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \dot{S}_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{\dot{Z}_{ik}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} P_k \right|} \quad (3-15)$$

直流馈入线路与其他新能源机组共同影响下的新能源并网点 i 的电压变化量为：

$$\Delta \dot{U}_i = \Delta \dot{U}_{ei} + \Delta \dot{U}_{di} = \dot{Z}_{ii} \dot{I}_{ei} + \sum_{j=1, j \neq i}^m \dot{Z}_{ij} \dot{I}_{ej} + \sum_{k=m+1}^n \dot{Z}_{ik} \dot{I}_{dk} \quad (3-16)$$

新能源并网点标称电压与新能源、直流并网引起的电压变化量之比为：

$$\frac{U_N}{|\Delta \dot{U}_i|} = \frac{U_N}{|\Delta \dot{U}_{ei} + \Delta \dot{U}_{di}|} = \frac{U_N}{\left| \dot{Z}_{ii} \dot{I}_{ei} + \sum_{j \neq i} \dot{Z}_{ij} \dot{I}_{ej} + \sum_{k=m+1}^n \dot{Z}_{ik} \dot{I}_{dk} \right|} \quad (3-17)$$

将上式进行推导变换，得到：

$$\frac{\left| \frac{U_N \dot{E}_{eqi}}{\Delta \dot{U}_i \dot{U}_i} \right|}{\left| \frac{U_N \dot{E}_{eqi}}{\dot{Z}_{ii}} \right|} = \frac{\left| \frac{U_N \dot{E}_{eqi}}{\dot{Z}_{ii}} \right|}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_j} \dot{S}_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{\dot{Z}_{ik}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_k} P_k \right|} \quad (3-18)$$

因此，含直流馈入的新能源并网点短路比指标也可以通过电压比值的形式来定义：

$$EDSCR_{Ui} = \frac{\left| \frac{U_N \dot{E}_{eqi}}{\Delta \dot{U}_i \dot{U}_i} \right|}{\left| \frac{U_N \dot{E}_{eqi}}{\dot{Z}_{ii}} \right|} \quad (3-19)$$

以电压比值定义的 $EDSCR_v$ 与以容量比值形式定义的 $EDSCR$ 具有相同的物理意义，物理本质也完全相同。 $EDSCR_v$ 评估系统电压支撑强度时更方便直观， $EDSCR_v$ 在评估时具有更高的准确性，二者都可为含直流馈入的新能源并网系统的稳定性评估提供重要参考依据，具有实际工程意义。

3.3.2 临界短路比

随着电力系统中直流输电和新能源发电技术的快速发展，电力电子设备（如换流器、逆变器）的大规模接入使得电力系统的动态特性发生了显著变化，传统静态稳定性分析方法已难以准确评估高比例电力电子设备接入下的系统稳定性。临界短路比（Critical Short Circuit Ratio, CSCR）作为衡量系统静态稳定性的重要指标，能够有效反映电力电子设备与交流系统之间的相互作用强度，是评估系统稳定边界的关键参数。近年来，国内外学者对临界短路比的研究逐渐深入，主要集中在 CSCR 的理论推导、影响因素分析及其在系统规划和运行中的应用。在此条件下，系统最大传输功率通常被采纳作为衡量系统最大传输功率的一个判据，系统电压失稳通常发生在系统运行功率接近最大传输功率情况下。在最大传输功率阶段，系统运行于临界状态，此时，负荷出现微小增加，都会导致系统电压骤降，系统发生失稳。

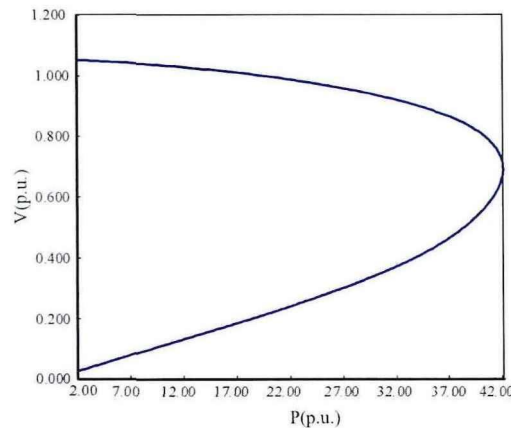


图 3-2 P-V 曲线等效模型

P-V 曲线在衡量电力系统稳定方面具有重要作用，通过对新能源并网受端系统中每一个节点 P-V 曲线的计算，可以得到两个有关受端电网电压稳定性的重要参数：负荷的极限传输功率和临界电压，根据这两个变量，可以得到系统中的负荷节点面对负荷波动维持电压稳定的能力，从而表征受端电网的电压稳定裕度。

临界短路比表示系统处于临界稳定运行状态时系统短路比的下限值，系统短路比与临界短路比的差值越大，表示系统越稳定，越不容易因负荷波动等原

因造成电压崩溃，具有更大的稳定裕度。

基于上述提出的以电压形式定义的含直流馈入的新能源并网点短路比公式，进行临界短路比极值的数学推导。

为简化计算， U_N 取标么值 1，将以电压形式定义的短路比公式简化为：

$$SCR_{ei-U} = \frac{|\dot{E}_{eqi}|}{|\Delta \dot{U}_i \dot{U}_i|} \quad (3-20)$$

对并网点 i 的交流系统电势 E_{eqi} 和并网点 i 的实际电压 U_i 取复数形式，可得：

$$\begin{cases} E_{eqi} = e_x + je_y \\ U_i = u_x + ju_y \end{cases} \quad (3-21)$$

根据交流系统电势与新能源并网点 i 的数值，经计算得到新能源并网前后并网点 i 的节点电压变化量：

$$\Delta U_i = U_i - E_{eqi} = (e_x + je_y) - (u_x + ju_y) \quad (3-22)$$

将新能源并网点 i 的电压变化量的复数形式代入以电压形式定义的短路比计算公式中，临界短路比可表示为：

$$CSCR = \frac{|e_x + je_y|}{|(u_x^2 - u_y^2 - e_x u_x + e_y u_y) + j(2u_x u_y - e_x u_y - e_y u_x)|} \quad (3-23)$$

为简化计算， E_{eqi} 取标么值为 1，可得：

$$CSCR = \frac{1}{|(u_x^2 - u_y^2 - u_x) + j(2u_x u_y - u_y)|} \quad (3-24)$$

求临界短路比极值转化为求函数 $F(u_x, u_y)$ 最值的问题。

$$\begin{aligned} F(u_x, u_y) &= |(u_x^2 - u_y^2 - u_x) + j(2u_x u_y - u_y)|^2 \\ &= u_x^4 + u_y^4 + 2u_x^2 u_y^2 - 2u_x^3 - 2u_x u_y^2 + u_x^2 + u_y^2 \end{aligned} \quad (3-25)$$

经计算，通过求函数的驻点求得该函数合理范围内的最值为 0.1389，最后，经变换计算得到含直流馈入的新能源并网系统临界短路比的极值为 2.683。

尽管本文通过理论推导获得的临界短路比极值 2.683 是基于典型系统参数的理想化计算结果，无法直接适用于所有含直流馈入新能源受端电网的工程场景，但仍具有实际意义。从理论层面：该极值的求解过程揭示了新能源场站交互作用与直流馈入强度的非线性耦合机理，通过构建统一的临界稳定判据表达式，阐明了新能源渗透率、直流功率占比与系统强度之间的量化关联规律，为实际系统参数敏感性分析与稳定裕度评估提供了理论基准；从工程应用层面，该极值可作为电网规划设计的参考阈值——当实际系统短路比接近该理论值时，需触发预警机制并启动稳定性校核，而针对不同拓扑结构或运行工况的电网，

可通过修正系数（如引入 0.8~1.2 的工况调整因子）实现判据的适应性拓展。此外，通过数学解析求取系统稳定边界的极值，突破了传统短路比指标依赖经验参数的局限性，为高比例新能源电网的稳定分析理论体系提供了新的方法论支撑。

3.4 含直流馈入的新能源短路比灵敏度分析

含直流馈入的新能源并网点短路比 EDSCR 的公式可表示为

$$EDSCR_i = \frac{|U_N E_{eqi} / Z_{ii}|}{\left| (P_i + jQ_i) + \sum_{j \neq i} \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} (P_j + jQ_j) + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ii}} P_k \right|} \quad (3-26)$$

由式（3-26）可知：对于含直流馈入的新能源并网系统，新能源并网点 i 的短路比 EDSCR_i 主要受新能源并网点注入功率和节点电压影响，并网点注入功率与节点电压具有很强的关联性，因此，主要考虑节点注入功率对新能源并网点的短路比 EDSCR 的影响。

为了详细计算节点注入功率对新能源并网点短路比 EDSCR 的影响，将式（3-26）在运行点处进行泰勒级数展开，并忽略高阶项，可得

$$EDSCR_0 + \Delta EDSCR = f(X_0 + \Delta X) \approx f(X_0) + M \Delta X \quad (3-27)$$

$$\Delta EDSCR = M \Delta X = M_{(1)} \Delta X_{(1)} + M_{(2)} \Delta X_{(2)} \quad (3-28)$$

式中 $X_{(1)}$ ——节点有功功率变化量， $X_{(1)} = [\Delta P_{w1}, \Delta P_{w2}, \dots, \Delta P_{wn}]^T$ ；

$X_{(2)}$ ——节点无功功率变化量， $X_{(2)} = [\Delta Q_{w1}, \Delta Q_{w2}, \dots, \Delta Q_{wn}]^T$ ；

ΔP_{wi} ——新能源并网点 i 有功功率变化量；

ΔQ_{wi} ——新能源并网点 i 无功功率变化量；

$\Delta EDSCR$ ——新能源并网点短路比 EDSCR 变化量，

$\Delta EDSCR = [\Delta EDSCR_1, \Delta EDSCR_2, \dots, \Delta EDSCR_n]^T$ ；

其中，M 为 EDSCR 灵敏度矩阵， $M_{(1)} = \frac{\partial EDSCR}{\partial X_{(1)}}$ ， $M_{(2)} = \frac{\partial EDSCR}{\partial X_{(2)}}$ 。

对于含 n 个新能源并网点的系统，EDSCR 灵敏度矩阵可表示为

$$M_{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial EDSCR_1}{\partial P_{w1}} & \frac{\partial EDSCR_1}{\partial P_{w2}} & \dots & \frac{\partial EDSCR_1}{\partial P_{wn}} \\ \frac{\partial EDSCR_2}{\partial P_{w1}} & \frac{\partial EDSCR_2}{\partial P_{w2}} & \dots & \frac{\partial EDSCR_2}{\partial P_{wn}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial EDSCR_n}{\partial P_{w1}} & \frac{\partial EDSCR_n}{\partial P_{w2}} & \dots & \frac{\partial EDSCR_n}{\partial P_{wn}} \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

$$M_{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial EDSCR_1}{\partial Q_{W1}} & \frac{\partial EDSCR_1}{\partial Q_{W2}} & \dots & \frac{\partial EDSCR_1}{\partial Q_{Wn}} \\ \frac{\partial EDSCR_2}{\partial Q_{W1}} & \frac{\partial EDSCR_2}{\partial Q_{W2}} & \dots & \frac{\partial EDSCR_2}{\partial Q_{Wn}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial EDSCR_n}{\partial Q_{W1}} & \frac{\partial EDSCR_n}{\partial Q_{W2}} & \dots & \frac{\partial EDSCR_n}{\partial Q_{Wn}} \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

将式 (3-29) 和式 (3-30) 代入式 (3-28) 中, 可得

$$\Delta EDSCR = M_{(1)} \Delta P_W + M_{(2)} \Delta Q_W \quad (3-31)$$

式中: $M_{(1)}_{ij}$ 为 EDSCR 对有功功率的灵敏度矩阵中第 i 行 j 列元素; $M_{(2)}_{ij}$ 为 EDSCR 对无功功率的灵敏度矩阵中第 i 行 j 列元素。

为简化分析, 将新能源机组作为风电机组考虑, 风电机组通常采用恒功率因数控制方法, 且风电场输出的无功功率与有功功率线性相关, 可得

$$\Delta Q_{wi} = \Delta P_{wi} \tan \delta_{wi} \quad (3-32)$$

式中: $\tan \delta_{wi}$ 为风电场并网点 i 的功率因数角。

将式 (3-32) 代入式 (3-31) 中, 可得

$$\Delta EDSCR_i = \Delta P_{wi} (M_{(1)} + M_{(2)} \tan \delta_{wi}) \quad (3-33)$$

EDSCR 对有功功率和无功功率的灵敏度矩阵 $M_{(1)}$ 和 $M_{(2)}$ 中各元素都可通过求偏导数得出, 为简化分析计算, 将式 (3-26) 中部分物理量进行适当简化处理。

令 $\sum_{j \neq i} \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} (P_j + jQ_j) = \alpha_j + \beta_j$ 和 $\frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} = R_j + X_j$, 式 (1) 可表示为:

$$\begin{aligned} EDSCR_i &= \frac{|U_N E_{eqi} / Z_{ii}|}{\left| (P_i + \alpha_j) + j(Q_i + \beta_j) + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ii}} P_k \right|} \\ &= \frac{|U_N E_{eqi} / Z_{ii}|}{\sqrt{\left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ii}} P_k \right)^2 + (Q_i + \beta_j)^2}} \end{aligned} \quad (3-34)$$

其中, $\alpha_j + \beta_j$ 可进行如下计算:

$$\alpha_j + \beta_j = (R_j + X_j)(P_j + jQ_j) = (R_j P_j - X_j Q_j) + j(R_j Q_j + X_j P_j) \quad (3-35)$$

可得:

$$\begin{cases} \alpha_j = R_j P_j - X_j Q_j \\ \beta_j = R_j Q_j + X_j P_j \end{cases} \quad (3-36)$$

分别对式 (3-34) 中变量 P_i , P_j , Q_i , Q_j 求偏导数, 可得 EDSCR 灵敏度矩

阵 $M_{(1)}$ 和 $M_{(2)}$ 中各个元素，分别为：

1) EDSCR_i 对本节点有功功率 P_i 的自灵敏度为

$$\frac{\partial EDSCR_i}{\partial P_i} = \frac{-|U_N E_{eqi} / Z_{ii}| \left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ij}} P_k \right)}{\left[\left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ij}} P_k \right)^2 + (Q_i + \beta_j)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-37)$$

2) EDSCR_i 对其他新能源并网节点有功功率 P_j 的自灵敏度为

$$\frac{\partial EDSCR_i}{\partial P_j} = \frac{-|U_N E_{eqi} / Z_{ii}| \left[\left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ij}} P_k \right) R_j + (Q_i + \beta_j) X_j \right]}{\left[\left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ij}} P_k \right)^2 + (Q_i + \beta_j)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-38)$$

3) EDSCR_i 对本节点无功功率 Q_i 的自灵敏度为

$$\frac{\partial EDSCR_i}{\partial Q_i} = \frac{-|U_N E_{eqi} / Z_{ii}| (Q_i + \beta_j)}{\left[\left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ij}} P_k \right)^2 + (Q_i + \beta_j)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-39)$$

4) EDSCR_i 对其他新能源并网节点无功功率 Q_j 的自灵敏度为

$$\frac{\partial EDSCR_i}{\partial Q_j} = \frac{-|U_N E_{eqi} / Z_{ii}| \left[(Q_i + \beta_j) R_j - \left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ij}} P_k \right) X_j \right]}{\left[\left(P_i + \alpha_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{Z_{ik}}{Z_{ij}} P_k \right)^2 + (Q_i + \beta_j)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-40)$$

由式 (3-37) - (3-40) 可知：(1) EDSCR 的自灵敏度反映了新能源并网节点 i 自身有功和无功功率变化对本节点的影响，EDSCR 的互灵敏度反映了其他新能源并网点注入有功和无功功率变化对本节点的影响，深入反映了系统中风电并网节点的电气强度关系；(2) EDSCR 灵敏度定量表达了不同新能源并网点之间的相互影响程度，EDSCR 对节点注入功率灵敏度的值越大，表明电气连接程度越紧密。

3.5 仿真验证

本文基于 PSASP 仿真平台搭建 10 机 39 节点模型，计算各新能源并网点的短路比，并基于连续潮流法采用极限传输功率的思路计算新能源并网点的临界短路比。

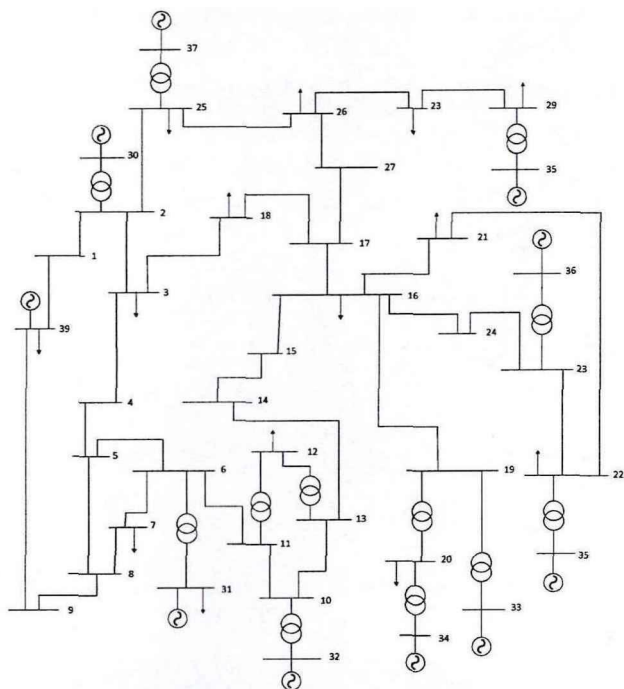


图 3-3 含直流馈入的新能源并网系统仿真图

为验证本文所提含直流馈入的新能源并网点短路比指标的合理性和可行性以及对系统电压支撑强度的指征性，分别从新能源机组机端过电压短路比与短路比的关系、新能源渗透率对短路比的影响、直流馈入线路与短路比的关系以及短路比与电压支撑强度的关系几方面进行仿真验证。

3.5.1 新能源并网点临界短路比计算

风电机组的仿真参数设置如表 3-1 所示。

表 3-1 风电机组仿真参数设置

发电机名称	母线名	类型	有功功率 (MW)	无功功率 (MVar)	功率因数
G01	Bus32	PV	540	146.56	0.99768
G02	Bus33	PV	540	91.82	1.00000
G03	Bus38	PV	540	-1.45	0.98585
G04	Bus39	PV	840	49.56	0.99826
G05	Bus37	PV	640	43.65	0.96509
G06	Bus30	PV	540	14.17	0.99966

基于所搭建的含直流馈入的新能源并网系统模型，采用极限传输功率得到临界短路比的方法，对模型进行电压稳定仿真计算，将仿真结果结合上述提出的短路比指标定义公式，计算得到各新能源并网点的临界短路比数值。

表 3-2 各新能源并网点的短路比和临界短路比

风电机组	并网母线	EDSCR _U	临界短路比
G01	Bus32	3.404	2.031
G02	Bus33	3.486	2.810
G03	Bus38	2.649	2.389
G04	Bus39	3.115	2.157
G05	Bus37	2.419	2.578
G06	Bus30	3.299	2.764

由表 3-2 结果可得，所搭建模型的新能源并网节点中，除 bus5 外，其余新能源节点短路比均大于基于极限传输功率得到的临界短路比，可知这些新能源并网节点稳定性较高，节点 5 稳定性较差。

可以看到，基于极限传输功率得到的临界短路比与 3.3.2 节基于理论推导得到的临界短路比数值有一定误差，主要原因有两点：一是理论计算的模型采用了一些简化假设以及简化数据处理，而仿真模型包含了更多直流与新能源并网场景下设备与参数的细节，并且求解算法更具复杂性；二是计算模型只考虑了稳态条件，仿真模型能够捕捉到系统暂态响应，包含更多动态过程，且在不同新能源并网节点进行仿真计算。以上因素均会导致仿真得到的临界短路比数值与理论计算数值有差异，但误差均在合理范围内，不会对结论造成本质性影响。

3.5.2 机端过电压与短路比的关系

对于含直流馈入的新能源并网系统，系统发生故障扰动后，新能源机组的机端过电压与新能源并网节点的短路比密切相关。基于 PSASP 仿真程序，对直流及新能源并网系统，对 G02、G03、G05 三个风电机组分别设置三相短路故障，对扰动后并网点电压波动情况进行仿真分析。

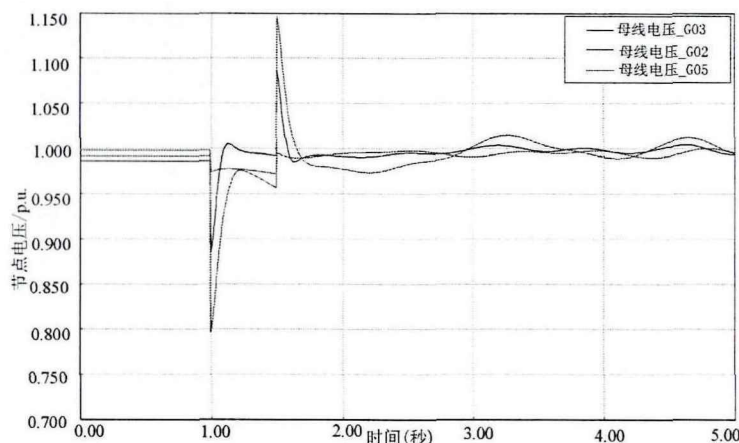


图 3-4 系统故障扰动后不同新能源机组过电压

由图 3-4 仿真结果可得，新能源机组 G05 机端过电压最高达到 1.15pu；新能源机组 G03 机端过电压最高为 1.079pu；新能源机组 G02 机端过电压最高为 0.997pu。直流馈入情况相同的条件下，新能源并网点短路比越小的新能源机组，系统故障扰动后过电压最大值越大且电压跌落越多，稳定之后电压波动幅值较另外两组也更大；反之，新能源并网点短路比越大的新能源机组系统故障扰动后过电压最大值越小，且扰动后电压曲线越平缓。

仿真结果表明，短路比较小的新能源机组并网点强度较弱，无法有效抑制系统故障引起的电压波动；而短路比较大的新能源机组并网点强度较强，能够更好地控制故障后的电压波动。

3.5.3 新能源渗透率对短路比的影响

在含直流馈入的新能源并网受端电网场景下，新能源渗透率对新能源机组并网点短路比也有一定影响，基于 PSASP 仿真平台，改变新能源机组数量，设置新能源机组渗透率由低到高变化，对短路比进行仿真分析。

表 3-3 新能源渗透率为 20%各新能源并网点的短路比

风电机组	并网母线	EDSCR _U
G04	Bus39	3.199
G05	Bus37	3.056

表 3-4 新能源渗透率为 30%各新能源并网点的短路比

风电机组	并网母线	EDSCR _U
G03	Bus38	2.685
G04	Bus39	3.134
G05	Bus37	3.035

表 3-5 新能源渗透率为 40%各新能源并网点的短路比

风电机组	并网母线	EDSCR _U
G02	Bus33	3.391
G03	Bus38	2.648
G04	Bus39	3.059
G05	Bus37	3.017

由表 3-3、3-4、3-5 的仿真结果可得，直流馈入情况不变、仅改变新能源机

组并网的情况下,系统新能源渗透率越高,对应新能源并网点短路比数值越小,说明新能源渗透率的升高导致系统强度减弱,对扰动的抵抗能力下降。实际电力系统中,必要时可对新能源机组出力加以控制,避免短路比过低导致系统发生稳定性问题,也可采取合适的保护装置及控制措施,增加新能源高占比电力系统的稳定性及可靠性。

3.5.4 直流馈入对短路比的影响

相较于以往提出的新能源系统短路比,本文所提指标增加了直流馈入的考虑因素,直流馈入对短路比也有一定影响,基于 PSASP 仿真平台,设置有无直流馈入线路对比,对新能源并网点短路比进行仿真分析。

表 3-6 无直流馈入场景下各新能源并网点的短路比

风电机组	并网母线	EDSCR _U
G01	Bus32	2.989
G02	Bus33	2.622
G03	Bus38	2.434
G04	Bus39	2.661
G05	Bus37	2.668
G06	Bus30	2.832

表 3-7 多直流馈入场景下各新能源并网点的短路比

风电机组	并网母线	EDSCR _U
G01	Bus32	2.035
G02	Bus33	2.443
G03	Bus38	2.350
G04	Bus39	2.386
G05	Bus37	2.080
G06	Bus30	2.484

由表 3-6、3-7 的仿真结果可得,在新能源并网系统中馈入直流线路后,对新能源并网点的短路比有显著影响。直流馈入新能源并网系统后,短路比数值变小,系统强度减弱,对故障扰动的抵抗能力下降,在实际工程中,系统可能需要更复杂精确的控制策略来确保系统安全稳定运行。

根据 3.4.2 内容提出的含直流馈入的新能源并网点临界短路比阈值,在多新能源并网场景下,馈入直流之后,所选新能源并网节点的短路比均小于临界

短路比，理论上系统不稳定，但该系统实际稳定。上文提出的临界短路比是通过理论推导得到，具有一定保守性，实际工程中，临界短路比阈值应根据电网实际情况进行调整，以便更加科学准确的对系统新能源并网点稳定性进行评估。

3.5.5 电压支撑强度评估

系统稳定运行时，实际短路比与临界短路比之间存在一定的差值，为系统的稳定裕度。当系统新能源并网容量增大，短路比逐渐减小直至逼近临界短路比，系统可能崩溃，无法恢复正常运行状态。

在 PSASP 仿真平台，对于含直流馈入的新能源并网系统，选取新能源并网节点 bus37，增加整个系统的新能源并网容量，直至该新能源并网点短路比接近临界短路比，设置 37 节点发生三相短路故障，对系统故障后该点的暂态稳定情况进行仿真分析。

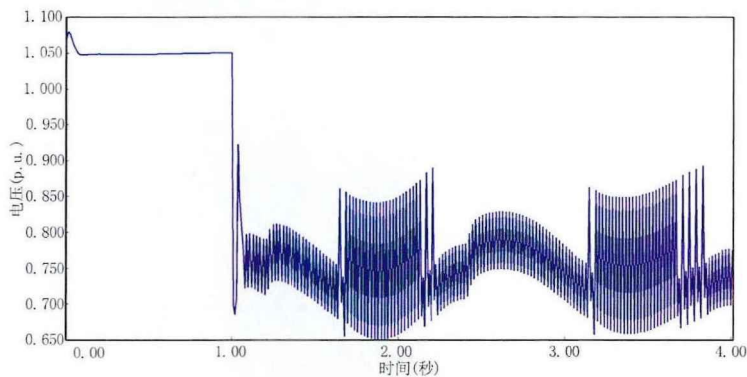


图 3-5 新能源极限并网容量下故障后暂态稳定情况

图 3-5 所示仿真结果表明，新能源并网容量较高时，系统稳定性降低，导致故障扰动后系统震荡失稳。说明所提短路比指标对含直流馈入的新能源并网系统稳定性具有一定指征作用，是系统电压支撑强度的一个量化指标，有助于分析系统无功补偿需求、优化电网结构以及调整控制策略，具有一定工程意义。

3.6 本章小结

本章提出了含直流馈入的新能源并网场景下的新能源并网点短路比指标，并基于所提指标对临界短路比进行理论推导得到临界短路比极值，并对短路比指标的合理性和可行性进行仿真验证。具体结论如下：

(1) 基于叠加定理，将含直流馈入的新能源并网系统分为交流系统、新能源系统及直流系统的叠加，分别列出节点电压方程，得到交流系统短路容量、新能源并网等效容量以及等效直流输送功率，采用交流系统短路容量与新能源等效并网容量加等效直流输送功率之和的比值来定义短路比指标 EDSCR。对新

能源并网点标称电压与新能源并网引起的电压变化量之比进行一定数学变换，得到以电压形式定义的短路比指标 $EDSCR_U$ 。两种短路比指标的表达式有所不同，但是物理意义相同，对系统稳定性评估的效果也是相同的。

(2) 基于以电压形式定义的短路比指标，对临界短路比进行数学推导，得到临界短路比极值 2.683。在实际工程中，对于含直流馈入的新能源并网系统，建议将新能源并网点的临界短路比阈值设为 2.683。

(3) 对所提短路比指标的合理性进行仿真验证。新能源机组并网点短路比越小，故障扰动期间机端过电压越高，抑制系统电压波动的能力较弱；直流馈入条件相同的情况下，新能源渗透率越高，新能源并网点短路比数值越小，系统强度越弱；新能源并网系统馈入直流线路增多后，短路比数值变小，系统强度减弱；增加新能源并网容量至短路比接近临界短路比，系统故障后振荡失稳。以上仿真结果说明本文所提短路比指标具有合理性和可行性，且对系统电压支撑强度具有一定指征作用。

第 4 章 含直流馈入的新能源并网系统薄弱点辨识与无功优化

4.1 引言

随着高比例新能源并网与多直流馈入的协同发展，现代电力系统面临电压稳定与动态调节能力的双重挑战。在新能源机组替代传统同步机、直流输电依赖换流器动态特性的背景下，系统无功支撑能力弱化与电压波动加剧的矛盾日益凸显，尤其在高渗透率场景下，局部电网薄弱节点可能引发连锁性电压失稳。现有研究多聚焦于单一场景的静态薄弱点识别，缺乏对新能源出力随机性与直流并网特性的协同分析，且传统无功优化方法在处理多目标、非线性约束时易陷入局部最优，难以平衡电压质量与运行经济性之间的关系。

针对上述问题，本章提出基于第三章含直流馈入的新能源并网系统短路比指标的薄弱点综合辨识策略，通过构建计及新能源出力波动、直流馈入特性的评估指标，量化节点电压脆弱度，实现薄弱节点的筛选与排序。在此基础上，设计改进多目标灰狼优化算法（IMOGWO），引入 Sobol 序列与随机反向学习融合的初始化优化方法，结合差分进化协同优化策略，并嵌入改进型收敛因子以避免早熟收敛问题，同步优化系统节点电压偏差与网络损耗。基于在 Matlab 搭建 33 节点含直流馈入的新能源并网系统，通过仿真验证所提方法的有效性与合理性，为电网无功资源的协同配置提供决策依据。

4.2 含直流馈入的新能源并网系统薄弱点辨识

4.2.1 新能源并网节点电压静态脆弱度评估模型

（1）含直流馈入的新能源并网短路比指标

本文第三章 3.3 节提出的含直流馈入的新能源并网系统短路比指标定义为

$$EDSCR_i = \frac{S_{aci}}{S_{eqi} + P_{deq}} = \frac{\left| \frac{U_N E_{eqi}}{Z_{ii}} \right|}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_j} \dot{S}_j + \sum_{k=m+1}^n \frac{\dot{Z}_{ik}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_k} P_k \right|} \quad (4-1)$$

（2）电压灵敏度指标

反映新能源节点电压对新能源出力波动的敏感程度，定义电压灵敏度指标为

$$VSI_i = \left| \frac{\partial U_i}{\partial P_i} \right| \cdot \frac{P_{eN}}{U_N} \quad (4-2)$$

式中 $\left| \frac{\partial U_i}{\partial P_i} \right|$ ——电压灵敏度项，单位新能源出力变化引起的电压幅值变化率；
 $\frac{P_{eN}}{U_N}$ ——标准化功率项，将新能源额定容量归一化，消除量纲并反映该节点的最大潜在扰动能力。

综合上述物理量的定义，提出衡量含直流馈入的新能源并网系统节点脆弱度综合指标 CIV_i ，定义为

$$CIV_i = \omega_1 \cdot \frac{1}{EDSCR_i} + \omega_2 VSI_i \quad (4-3)$$

式中 ω_1 、 ω_2 ——权重系数。

新能源并网系统节点脆弱度综合指标 CIV_i 值越小，则该节点的抗扰动能力越强。由于在高比例新能源并网与多直流馈入的新型受端电网场景下，其电压稳定性的核心矛盾在于系统强度（短路容量）与扰动功率（新能源波动与直流调节）的动态平衡，且本文第三章已经针对传统短路比的不足提出了适配该场景的改进新能源短路比指标，因此采用改进短路比指标为主导、电压灵敏度指标为补充的节点脆弱度综合指标能够更准确的对新能源节点的强弱进行有效评估。

为了确定改进短路比指标与灵敏度指标在综合评估模型中的权重分配，采用层次分析法构建判断矩阵，考虑到改进短路比指标 $EDSCR_i$ 能直接反映新能源并网点的静态电压稳定裕度，显式量化交直流耦合作用对系统强度的影响，工程适用性更强，而灵敏度指标能表征新能源出力波动对节点电压的动态影响强度，补充反映暂态风险，基于 1-9 标度法，定义改进短路比与灵敏度的相对重要性，建立判断矩阵，如式（4-4）所示。通过计算特征向量与归一化处理后，进行一致性检验，即可得到改进短路比指标与灵敏度指标的权重系数 $\omega_1 = 0.75, \omega_2 = 0.25$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

权重系数 ω_1 取 0.75， ω_2 取 0.25，其优势体现在以下两个方面：一是改进短路比从静态系统强度角度量化全局抗扰动能力，而灵敏度反映新能源动态波动对该新能源节点电压的即时影响。例如，某节点短路比适中但灵敏度极高时（如临近负荷中心），综合指标可识别其暂态风险，避免单一指标漏判；二是改进短路比指标通过耦合因子量化了其他新能源节点对所研究新能源节点的综合影响，其物理意义明确且与电压稳定临界条件直接关联，

能够从机理层面精准定位系统薄弱环节，而灵敏度指标仅反映单一节点动态特性，缺乏对多源耦合作用的全局描述。并且对于含直流馈入的受端电网场景，改进短路比分母显式包含直流等效传输功率项，可捕捉直流功率波动对新能源并网点的叠加扰动效应，而灵敏度指标难以区分扰动来源，易低估直流馈入的动态风险。因此赋予改进短路比指标 75%权重、灵敏度指标 25%权重既充分结合了两类指标的互补优势，又凸显了短路比指标在含直流馈入的新能源并网系统脆弱性评估中的核心地位，二者结合提高了薄弱点辨识的准确性，并使评估结果更贴合实际电网。

4.2.2 节点电压静态脆弱度评估流程

基于上述提出的节点电压静态脆弱度评估模型对含直流馈入的新能源并网节点进行强弱评估的详细流程如下所示：

（1）输入原始数据：包括电网拓扑参数、风机额定容量、直流线路参数和初始负荷分布等。

（2）数据预处理：标么化处理与含直流与新能源的等效模型构建。

（3）含直流馈入的新能源并网节点短路比数值计算。

（4）新能源并网点电压灵敏度计算。

（5）节点综合脆弱度指标计算，并通过归一化处理，消除量纲差异，确保不同指标间具有可比性。

（6）进行仿真验证，若仿真结果与理论计算结果相差过大，则返回第一步修正直流耦合因子，重新输入系统参数，直至仿真结果与理论计算结果一致。

（7）输出节点电压综合脆弱度评估结果。

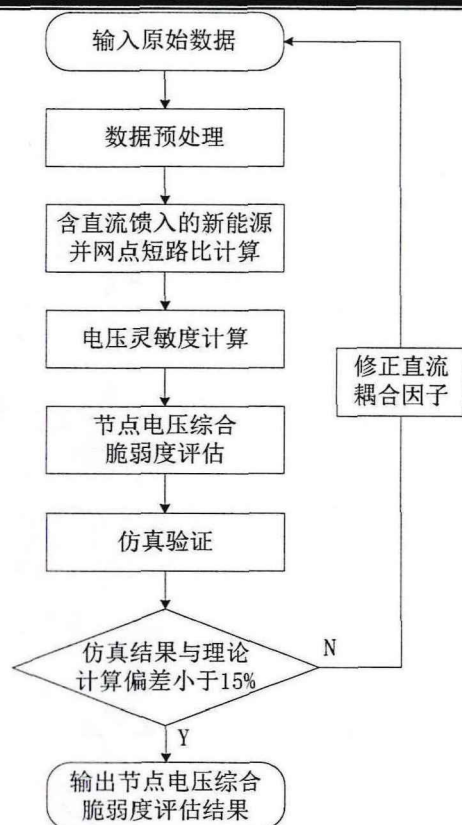


图 4-1 基于静态脆弱度评估模型的薄弱点辨识评估流程图

4.3 系统无功优化模型建立

4.3.1 目标函数

针对含直流馈入的新能源并网系统无功优化问题，以节点电压波动最小化和系统网损最小化为双优化目标，建立如下多目标函数模型。

(1) 节点电压波动最小化目标

考虑新能源出力随机性、负荷波动及直流功率调制对电压动态特性的影响，通过节点电压波动来衡量系统电压稳定，由节点实际电压与与节点额定电压求得，计算公式为

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \left| \frac{U_{iac} - U_N}{U_N} \right| \quad (4-5)$$

式中 U_{iac} —— 节点 i 实际电压；

U_N —— 节点 i 额定电压；

n —— 系统节点总数。

(2) 系统有功网损

$$f_2 = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^i I_{ij,k}^2 R_{ij} \quad (4-6)$$

式中 $I_{ij,t}$ ——t时刻节点 i, j 之间电流;

R_{ij} ——支路 i, j 电阻;

N ——系统支路数;

T ——划分的时段数。

(3) 多目标函数定义

$$\min F(X) = [f_1(X), f_2(X)] \quad (4-7)$$

式中 $f_1(X)$ ——节点电压波动最小化目标;

$f_2(X)$ ——系统有功网损最小化目标。

4.3.2 约束条件

(1) 等式潮流约束

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} + P_{ei} - P_{id} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij}) \\ Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Li} + Q_{ei} - Q_{id} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4-8)$$

式中 P_{Gi} 、 Q_{Gi} ——发电机的有功功率、无功功率;

P_{Li} 、 Q_{Li} ——节点负荷的有功功率、无功功率;

P_{id} 、 Q_{id} ——换流站节点的有功功率、无功功率;

P_{ei} 、 Q_{ei} ——新能源并网点注入的有功功率、无功功率;

Q_{Ci} ——补偿节点的无功补偿量;

U_i 、 U_j ——节点 i 和 j 的电压幅值;

G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} ——节点 i、j 之间的电导、电纳和节点电压相角差。

(2) 不等式约束条件

电力系统的不等式约束主要包括控制变量的上下限, 以及系统发电机出力
和节点电压约束, 具体表示为:

$$\begin{cases} U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \\ Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \\ Q_{Ci \min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci \max} \\ U_{di \min} \leq U_{di} \leq U_{di \max} \\ I_{di \min} \leq I_{di} \leq I_{di \max} \\ P_{di \min} \leq P_{di} \leq P_{di \max} \end{cases} \quad (4-9)$$

式中 $U_{i \min}$ 、 $U_{i \max}$ ——节点 i 电压上下限;

$Q_{Gi \min}$ 、 $Q_{Gi \max}$ ——发电机无功出力上下限;

$Q_{Ci \min}$ 、 $Q_{Ci \max}$ ——无功补偿容量上下限;

$U_{di\min}$ 、 $U_{di\max}$ —— 直流线路节点电压上下限；

$I_{di\min}$ 、 $I_{di\max}$ —— 直流线路节点电流上下限；

$P_{di\min}$ 、 $P_{di\max}$ —— 直流线路传输功率约束上下限；

4.4 基于改进灰狼优化算法的无功优化

4.4.1 经典灰狼优化算法

灰狼优化算法（Grey Wolf Optimizer, GWO）是一种基于灰狼群体捕食行为的智能优化算法。灰狼作为自然界中的顶级捕食者，通常以 5 至 12 只个体的规模群居，并形成了严格的社会等级结构，如图 4-2 所示。

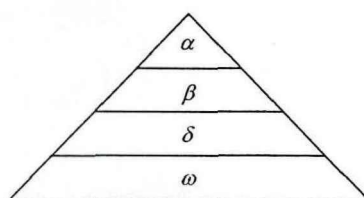


图 4-2 灰狼社会等级制度金字塔图

该等级结构呈金字塔状，具体分为四个层次：位于金字塔顶端的是狼群的首领，称为 α 狼， α 狼是群体中的决策者，负责制定狩猎计划、确定休息时间和地点以及分配食物等重要事务， α 狼的领导能力直接影响整个群体的生存与发展；第二层是 β 狼，它们作为 α 狼的辅助者，协助其进行决策，当 α 狼因故无法履行职责时， β 狼将接替其位置，此外， β 狼还承担着传达 α 狼指令并监督其他成员执行情况的任务，是连接首领与群体其他成员的重要纽带；第三层是 δ 狼，它们的主要职责是执行 α 狼和 β 狼的指令，负责侦查、警戒和看护等具体任务，值得注意的是，如果 α 狼或 β 狼的适应度下降，它们也可能被降级为 δ 狼；金字塔的最底层是 ω 狼，它们的主要作用是维持群体内部的平衡与和谐，尽管 ω 狼在群体中的地位较低，但其存在对于整个群体的稳定性具有重要意义。

灰狼群体的集体狩猎行为是其社会行为的另一显著特征。在这一过程中，灰狼的社会等级制度起到了关键作用，整个捕食活动通常由 α 狼主导。灰狼的狩猎行为可分为三个阶段：首先，它们会追踪、追逐并逐渐接近猎物；其次，通过包围和骚扰猎物使其无法移动；最后，发起攻击以捕获猎物。

这种基于灰狼社会等级的行为机制为优化算法的设计提供了重要启发，通过模拟灰狼群体的协作与分工，能够有效解决复杂的优化问题。为了在灰狼优化算法（Grey Wolf Optimizer, GWO）中模拟这种社会等级机制，将群体中表现最优的三匹狼 α 、 β 和 δ 分别代表当前最优解，并引导其他狼（候选解）向目标区域搜索，其余狼则被定义为 ω ，它们根据 α 、 β 或 δ 的位置信息来更新自身位

置。在算法中，灰狼围捕猎物的行为被抽象为一种位置更新机制，用于指导搜索过程向全局最优解靠近。其寻优原理如下：

(1) 包围猎物

在狩猎过程中，将灰狼围捕猎物的行为定义为：

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_p(k) - \bar{X}(k)| \quad (4-10)$$

$$\bar{X}(k+1) = \bar{X}_p(k) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (4-11)$$

式中 $\bar{D}$ ——距离向量；

$\bar{A}$ 、 $\bar{C}$ ——行为系数向量；

$\bar{X}_p$ ——猎物位置向量；

$\bar{X}$ ——灰狼位置向量；

k ——算法当前迭代次数。

式(1)代表灰狼个体与猎物之间的距离，式(2)表示灰狼的位置更新。其中系数向量 $\bar{A}$ 和 $\bar{C}$ 的计算公式为：

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r}_1 - \bar{a} \quad (4-12)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r}_2 \quad (4-13)$$

式中 $\bar{a}$ ——收敛因子，随着迭代次数从2线性减小到0；

r_1 、 r_2 ——模值取[0,1]之间的随机数。

(2) 狩猎

灰狼群体在捕猎过程中展现出独特的协同策略。当猎物位置被锁定后，群体在 α 狼引领下形成动态包围圈，由于优化问题中全局最优解的未知性，算法将 α 、 β 和 δ 三类优势个体定义为当前最优解的承载者，其余个体(ω 狼)依据这三者的位置信息进行空间坐标更新，逐步逼近潜在最优区域。位置更新机制的拓扑关系如图4-3所示。

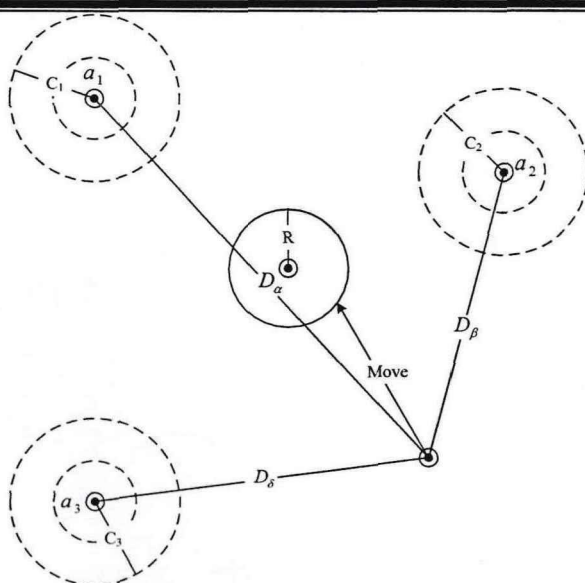


图 4-3 GWO 算法中灰狼位置更新示意图

灰狼个体跟踪猎物的数学模型为：

$$\begin{cases} \bar{D}_\alpha = |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X}| \\ \bar{D}_\beta = |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X}| \\ \bar{D}_\delta = |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X}| \end{cases} \quad (4-14)$$

式中 $\bar{D}_\alpha$ 、 $\bar{D}_\beta$ 、 $\bar{D}_\delta$ —— α 、 β 和 δ 狼与其他个体的距离；

$\bar{X}_\alpha$ 、 $\bar{X}_\beta$ 、 $\bar{X}_\delta$ —— α 、 β 和 δ 狼的当前位置；

$\bar{C}_1$ 、 $\bar{C}_2$ 、 $\bar{C}_3$ —— 随机向量；

$\bar{X}$ —— 当前灰狼位置向量。

$$\begin{cases} \bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot (\bar{D}_\alpha) \\ \bar{X}_2 = \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \cdot (\bar{D}_\beta) \\ \bar{X}_3 = \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \cdot (\bar{D}_\delta) \end{cases} \quad (4-15)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3} \quad (4-16)$$

式 (4-11) 定义了狼群中 ω 个体朝 α 、 β 和 δ 狼前进的步长和方向，式 (4-12) 定义了 ω 狼的最终位置。

(3) 猎物捕获（局部最优）

当猎物活动趋于静止时，灰狼通过渐进逼近完成最终捕杀。算法中通过调节参数 $\bar{a}$ 实现该过程的数学建模，随着迭代次数增加， $\bar{a}$ 值从 2 线性递减至 0，导致对应的参数 $\bar{A}$ 在 $[-a, a]$ 的波动范围内同步变化。如图 4-4 (a) 所示，当 $\bar{A}$ 的值位于区间内时，灰狼的下一位置可以位于其当前位置和猎物位置之间的任意位置，当 $|\bar{A}| < 1$ 时，狼群向猎物发起攻击（陷入局部最优）。

(4) 猎物搜寻（全局探索）

灰狼群体在搜索过程中，以 α 、 β 和 δ 狼的位置信息作为引导，展开协同搜索行为，在寻找猎物时，灰狼个体首先分散行动，随后聚集形成包围圈以发起攻击。为了在算法中模拟这一行为，引入参数 $\bar{A}$ 作为控制因子：当 $|\bar{A}| > 1$ 时算法强制搜索个体偏离当前最优区域，从而增强全局探索能力。如图 4-4 (b) 所示， $|\bar{A}| > 1$ 促使灰狼远离局部最优解，扩大搜索范围以寻找潜在的全局最优解。这种机制有效平衡了算法的勘探与开发能力，避免过早陷入局部最优。

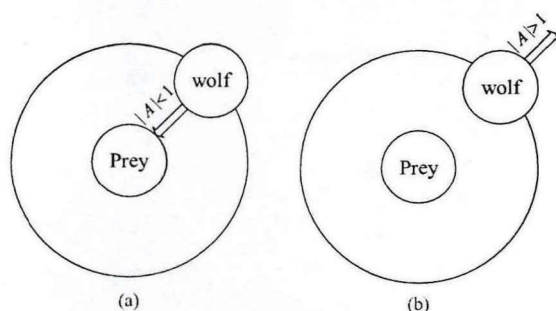


图 4-4 攻击猎物和寻找猎物

灰狼优化算法包含一个关键参数 $\bar{C}$ 来增强解的多样性。如式 (4-9) 所示，参数 $\bar{C}$ 是区间 $[0, 2]$ 内的随机值， $\bar{C}$ 的概率权重反映了灰狼个体对目标位置的作用强度，当 $|\bar{C}| > 1$ 时表示影响较大，反之则影响较弱。值得注意的是，与线性衰减参数 $\bar{A}$ 不同， $\bar{C}$ 在整个优化过程中保持非线性变化特性，从而可以在解空间内持续开展全局搜索策略。

算法优化的过程中，初始阶段通过随机生成灰狼种群建立候选解集。在迭代过程中， α 、 β 和 δ 狼三类优势个体协同预测猎物的可能区域（潜在最优解区域），灰狼成员依据其与猎物的距离更新其位置。为确保勘探与开发的平衡，核心参数 $\bar{a}$ 需从初始值 2 按预设规则衰减至 0。当 $|\bar{A}| > 1$ 时，候选解远离猎物；当 $|\bar{A}| < 1$ 时，则候选解逼近猎物。这种参数调控机制与 $\bar{C}$ 的随机特性形成互补效应，在接近全局最优解的迭代后期阶段，当算法陷入局部收敛时， $\bar{C}$ 的概率特性可有效打破搜索僵局，为摆脱局部极值发挥了重要作用。图 4-5 为 GWO 算法的流程示意图。

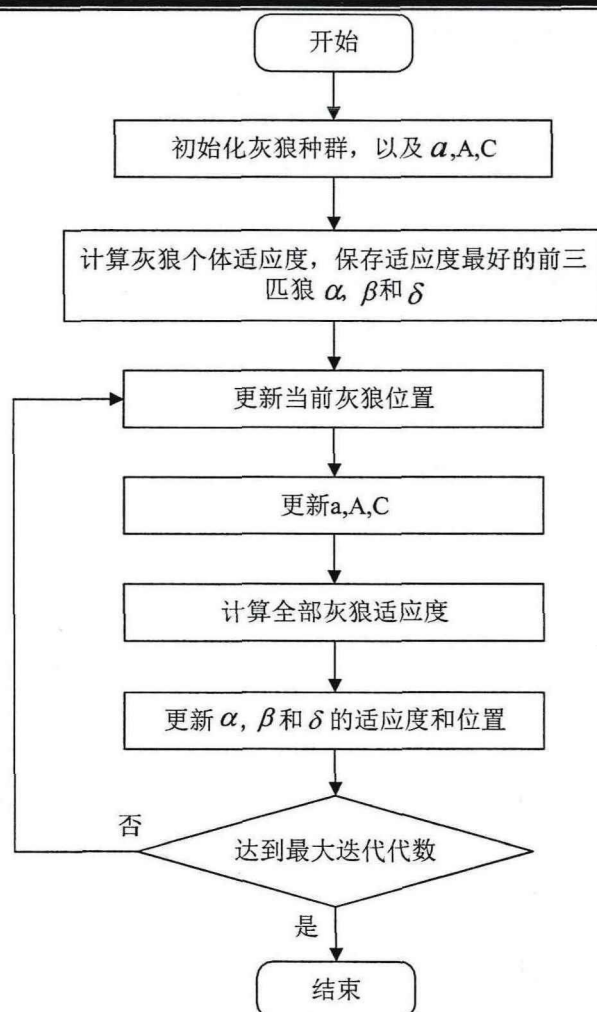


图 4-5 灰狼优化算法流程图

传统灰狼算法 GWO 在处理系统无功优化问题时存在以下局限性:

(1) 单目标局限性: 传统 GWO 仅适用于单目标优化问题, 无法直接处理多目标优化问题 (如同时优化电压波动和网损);

(2) 局部最优陷阱: 由于 α 狼不一定是全局最优点, 在不断的迭代中, 不断逼近前 3 匹狼, 因此, 在复杂非线性问题中, 传统 GWO 容易陷入局部最优, 尤其是高维、多峰问题;

(3) 参数敏感性: 传统 GWO 的性能高度依赖于参数设置 (如 $\bar{a}$ 和 $\bar{C}$), 缺乏自适应调节机制。

4.4.2 改进灰狼优化算法

多目标灰狼优化算法 (MOGWO) 在传统灰狼算法的基础上, 引入了 Pareto 支配关系对解集进行分层排序, 保留非支配解 (Pareto 最优解), 通过拥挤度计算 (Crowding Distance) 评估解的分布性, 确保解集的多样性, 同时引入外部存

档 (External Archive) 机制存储非支配解, 确保最优解的保留和更新。MOGWO 通过动态调整参数 $\bar{a}$ 和 $\bar{c}$, 增强了算法的全局搜索能力和局部开发能力: 控制参数 $\bar{a}$ 从 2 线性递减至 0, 控制搜索范围从全局探索向局部优化过渡, 而参数 $\bar{c}$ 则采用非线性随机衰减策略, 在迭代过程中保持一定的随机性, 避免过早收敛。

然而, MOGWO 在迭代过程中仍存在进化机制单一、种群多样性不足以及易陷入局部最优等问题。为此, 本文通过一种改进的多目标灰狼优化算法 (Improved Multi-Objective Grey Wolf Optimizer, IMOGWO) 来进行无功优化, 通过以下策略提升算法性能:

(1) 种群初始化策略优化

为提升初始种群分布的均匀性与全局搜索潜力, 提出了 Sobol 序列与随机反向学习融合的初始化方法。Sobol 序列是一种基于确定性低差异采样的拟随机数生成方法, 其生成的灰狼个体在解空间内具有高均匀性与覆盖性。对种群中第 i 个体在第 j 维的分量 $x_{i,j}$ 进行初始化:

$$x_{i,j} = x_j^{\min} + \text{Sobol}(i,j)(x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (4-17)$$

式中 $\text{Sobol}(i,j)$ ——Sobol 序列生成的第 i 个样本在第 j 维的值;

$x_j^{\max}$ 、 $x_j^{\min}$ ——变量上下限。

在 Sobol 初始化基础上, 进一步生成反向种群以增强全局探索能力:

$$x_j^{\text{opposite}} = x_j^{\min} + x_j^{\max} - x_{i,j} \quad (4-18)$$

通过合并原始种群与反向种群, 能够筛选适应度更优的个体构成初始种群, 从而避免搜索盲区。

(2) 收敛因子非线性调整

在传统灰狼算法中, 收敛因子 $\bar{a}$ 的值由 2 线性递减至 0, 用于控制灰狼个体搜索与攻击猎物, 然而, 这种线性递减方式存在明显缺陷: 算法在迭代初期和后期缺乏明确的搜索重点, 难以有效平衡全局探索与局部开发, 从而影响全局最优解的搜索效率。为此, 本文提出一种非线性收敛因子调整策略, 其表达式如下:

$$|\bar{a}| = 2 \left[1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} \frac{k}{k_{\max}} \right) \right] \quad (4-19)$$

式中 $k_{\max}$ ——灰狼种群最大迭代次数。

调整前后的收敛因子 $\bar{a}$ 的收敛曲线如图 4-6 所示。

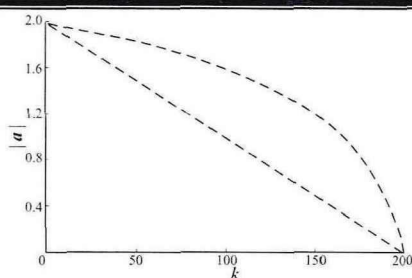


图 4-6 收敛因子调整前后对比

(3) 基于差分进化的混合优化机制

针对传统多目标灰狼算法 (MOGWO) 因进化机制单一导致的种群多样性不足与局部收敛问题, 本节提出差分进化协同优化策略, 通过融合差分进化 (Differential Evolution, DE) 的变异、交叉与选择算子, 重构种群更新机制。查分变异操作在每轮迭代中, 从种群中随机选取三个独立个体 X_{r1} 、 X_{r2} 、 X_{r3} , 生成扰动向量:

$$V_{i,j} = X_{r1,j} + F \cdot (X_{r2,j} - X_{r3,j}) \quad (4-20)$$

式中 $V_{i,j}$ —— 第 i 个变异后的新个体;

$X_{r1,j}$ 、 $X_{r2,j}$ 、 $X_{r3,j}$ —— 父代中 3 个随机个体;

F —— 差分缩放因子。

二项式交叉操作将父代个体 $X_{i,j}$ 与变异个体 $V_{i,j}$ 按交叉概率 $C_r \in [0.95, 1.0]$ 进行混合, 生成子代个体, 公式为:

$$M_{i,j} = \begin{cases} V_{i,j}, & \text{若 } r_j \leq C_r \text{ 或 } j = j_{rand}, j \in J \\ X_{i,j}, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (4-21)$$

式中 J —— 交叉位元素下标的集合;

$M_{i,j}$ —— 交叉后的新个体;

C_r —— 交叉率;

r_j —— $[0, 1]$ 之间的随机数。

精英保留选择操作通过非支配排序与拥挤距离计算的方式对比子代 $M_{i,j}$ 与父代 $X_{i,j}$ 的支配关系, 并从排完序的混合种群中筛选出非支配层级高且分布稀疏的个体形成新一代种群。

(4) 参数自适应调整策略

为提升算法鲁棒性, 设计动态参数调节机制。其中, 缩放因子 F 随迭代次数非线性递减, 迭代初期 $F=0.95$ 增强全局探索, 迭代后期 $F=0.85$ 强化局部开发; 交叉概率 C_r 根据变量耦合特性自适应调整, 对于强耦合问题取 $CR=1.0$, 弱耦合问题取 $CR=0.95$ 。

(5) 基于 Beta 分布的头狼选择优化

传统 MOGWO 算法中应用轮盘赌策略过度依赖拥挤距离,从而导致了领导种群同质化以及算法过早收敛的问题,针对此问题提出了 Beta 分布驱动的非线性选择压力调整策略。适应度分配过程中,首先计算外部存档中非支配解的拥挤距离,然后结合 Beta 分布概率密度函数分配适应度,具体公式为:

$$F = (1 - e^{-C_d})^\gamma \quad (4-22)$$

式中 C_d —— 拥挤距离;

γ —— 领导者选择压力。

基于得到的适应度值,采用轮盘赌策略从外部解集中选取 3 个非支配解作为 r_f 、 β 和 δ 狼,如式 (4-19) 所示。

$$\gamma = \begin{cases} \left\lceil -\left(\cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{k}{k_{\max}}\right) - 1 + \sigma_1 \cdot \text{betarnd}(p, q)\right) \right\rceil, k < \frac{k_{\max}}{2} \\ \left\lceil -\left(-1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{k}{k_{\max}}\right) + \sigma_2 \cdot \text{betarnd}(p, q)\right) \right\rceil, k \geq \frac{k_{\max}}{2} \end{cases} \quad (4-23)$$

式中, σ_1 和 σ_2 为调节系数,经多次无功优化仿真测试验证,当参数组合取 $\sigma_1 = 0.2$ 、 $\sigma_2 = 0.1$ 时,算法生成的 Pareto 前沿解集展现出均衡的空间分布特性和多样性,并且该参数配置下的优化方案在提升电网运行稳定性与成本效益方面表现优异,同步实现了算法收敛速度与迭代稳定性的协同优化。此外,引入基于 Beta 概率分布构造的随机算子 betarnd ,通过对决策变量施加可控扰动增强了种群主导个体的筛选效率,提高了头狼选择的多样性。算法迭代过程中趋势因子 γ 的非线性自适应调节机制如图 4-7 动态曲线所示。

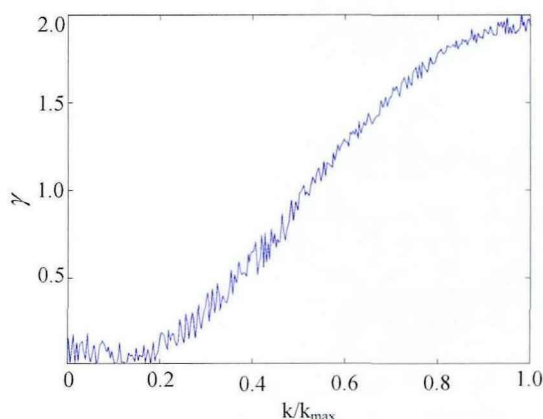


图 4-7 领导者选择压力变化趋势曲线

算法迭代前期, γ 的增长速度较慢, σ_1 对 γ 施加的扰动较大,使得外部档案中拥挤距离较低的灰狼个体被选为头狼的概率提高,扩大了种群搜索范围,低选择压力与高扰动因子结合的方式可以避免算法过早聚焦于局部区域,全局搜

索能力得到增强；算法迭代后期， γ 的增长速度加快，同时 σ_2 对 γ 施加的扰动减小，此时拥挤距离较大的灰狼个体更易被选为头狼，高选择压力与低扰动因子相结合加速了算法向最优解收敛，收敛速度得到提升，解集分布性也得到优化。改进多目标灰狼算法的具体运算流程如图 4-8 所示。

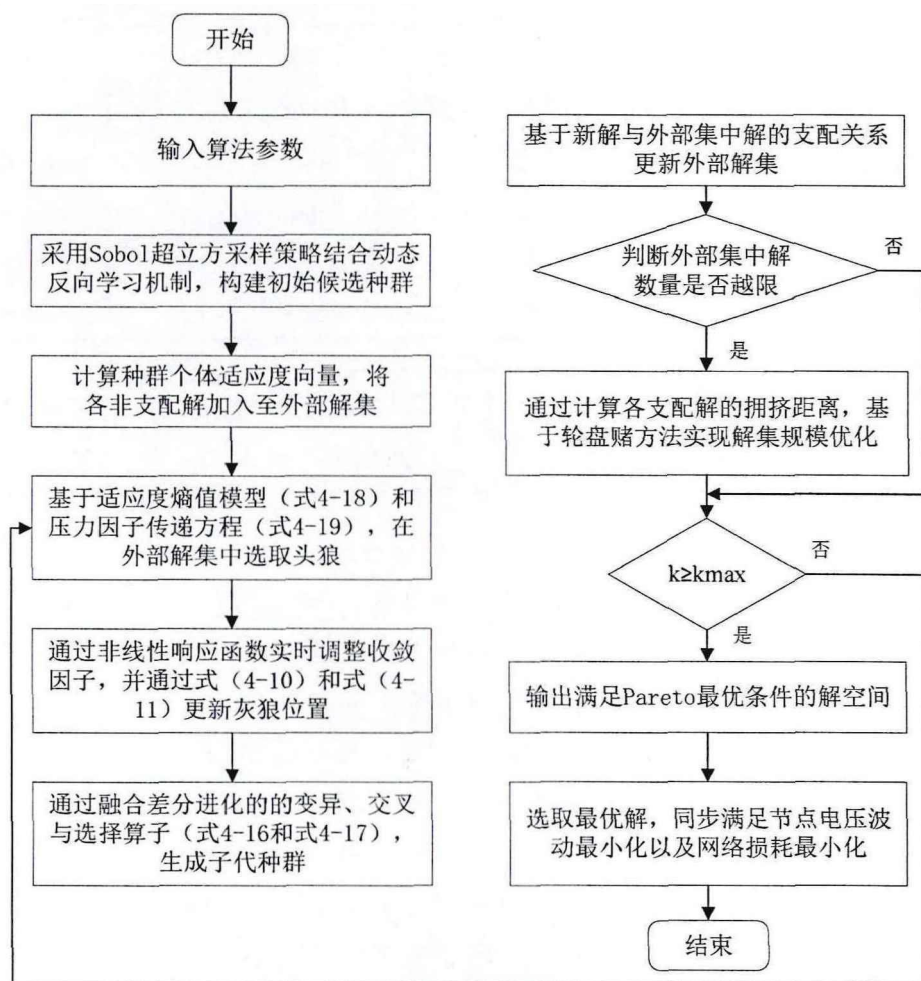


图 4-8 改进多目标灰狼算法流程图

4.5 仿真验证

4.5.1 薄弱节点辨识

为验证所提基于改进短路比与灵敏度指标的节点电压静态脆弱度评估模型的有效性，本节基于改进的 IEEE 33 节点系统进行薄弱节点辨识。基于经典 IEEE 33 节点模型，分别在节点 15、18、22、26、29、33 处接入双馈风电场，每个风电场包含 6 台 1.5 MW 双馈风力发电机组，风机参数详见表 4-1。分别在节点 8 和节点 25 馈入直流线路，采用定直流电压控制模式。

通过改进短路比指标与电压灵敏度指标计算，6 个新能源节点的脆弱度评

估结果如下表所示:

表 4-1 新能源节点脆弱度评估表

节点	新能源短路比	电压灵敏度	综合脆弱度评估指标	综合脆弱度评估指标
	$EDSCR_i$	VSI_i	CIV_i	CIV_i (归一化后)
15	1.706	0.44	0.550	0.975
18	1.632	0.26	0.525	0.820
22	2.664	1.09	0.554	1.000
26	3.215	0.90	0.458	0.404
29	2.047	0.47	0.483	0.560
33	2.875	0.53	0.393	0.000

基于新能源短路比 ($EDSCR_i$) 与电压灵敏度 (VSI_i) 的综合脆弱度评估结果表明, 6 个新能源节点的稳定性存在显著差异。根据归一化综合脆弱度指标排序, 节点 22、节点 15 及节点 18 为系统薄弱性较强 (即稳定性较差) 的节点。节点 22 ($EDSCR_i=2.664$, $VSI_i=1.09$) 因电压灵敏度在六个节点中最高, 其动态电压抗扰能力显著不足, 扰动下电压波动风险最大; 节点 15 ($EDSCR_i=1.706$, $VSI_i=0.44$) 短路比最低, 静态电压支撑能力薄弱, 易受故障冲击影响; 节点 18 ($EDSCR_i=1.632$, $VSI_i=0.26$) 虽灵敏度较低, 但极低的短路比导致其整体脆弱性仍较强。上述结果表明, 低短路比与高电压灵敏度的耦合效应是节点脆弱性恶化的关键诱因, 需优先针对此类节点采取稳定性增强策略。

为验证理论评估结论的准确性并揭示节点稳定特性, 本文进一步通过时域仿真对新能源节点的抗扰动能力进行量化分析。对节点设置单相接地短路故障, 故障从 1s 开始, 持续 0.5s, 观察 10s 内各新能源节点扰动后的电压波动幅值及恢复情况。如图 4-9 所示。

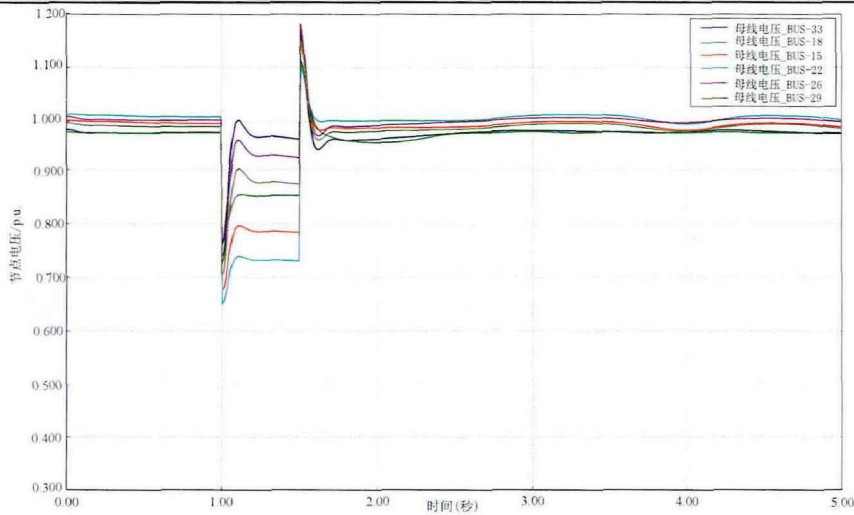


图 4-9 新能源节点受扰后电压波动

由仿真结果可以看出，节点 22 电压跌落至 0.7 p.u.以下且恢复最慢，其动态抗扰能力最差，节点 15 机端过电压最高，节点 18 次之，其电压支撑能力也较薄弱，节点 26、29、33 电压波动幅值相近且恢复较快，稳定性较强。理论评估的脆弱性排序与仿真动态表现一致，综合评估指标数值高的节点（节点 22、15、18）在故障场景下均呈现严重失稳，而综合评估指标数值低的节点（节点 26、29、33）表现稳定，说明所提指标能有效辨识新能源节点的薄弱性。

4.5.2 改进灰狼优化算法

在节点 22、15、18 处配置无功补偿装置，用于调节系统电压水平。为对比算法性能，分别对传统灰狼算法（GWO）、改进多目标灰狼算法（IMOGWO）以及多目标生态优化算法（MOEO）进行参数设置，GWO 与 IMOGWO 设定为种群规模为 50，最大迭代次数为 50，优化维度设定为 3（对应 3 个无功补偿节点）。MOEO 算法种群规模为 50，惯性权重 w 上限设置为 0.6，学习因子 $C1$ 、 $C2$ 设定为 2.01，最大迭代次数为 50，优化维度设置为 3。

为验证改进多目标灰狼优化算法（IMOGWO）的收敛性与优化效果，本节将其与多目标生态优化算法（MOEO）、传统灰狼算法（GWO）以及未改进的多目标灰狼算法（MOGWO）进行对比测试，通过 100 次独立实验的迭代曲线与优化结果分析，验证了 IMOGWO 的优越性，不同算法在 100 次迭代过程中的适应度值变化曲线如图 4-10 所示。

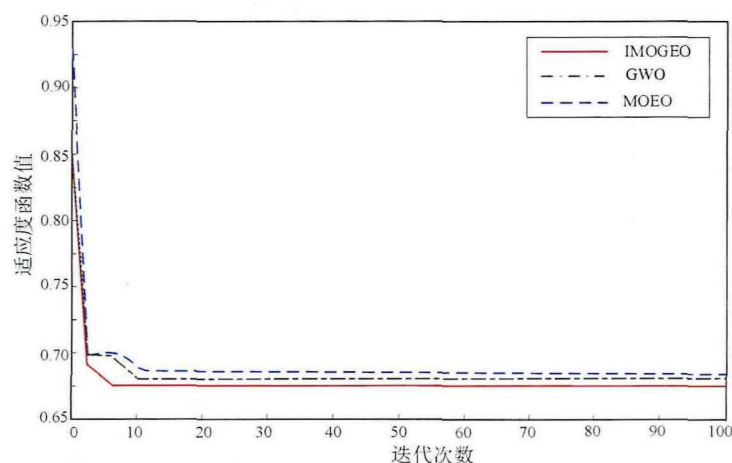


图 4-10 不同算法在 100 次迭代过程中的适应度值变化曲线

通过对比不难发现，IMOGWO 的迭代速度显著快于 MOEO 和 GWO，并且 IMOGWO 的最终适应度值最低，表明其优化精度优于对比算法，具有更高的寻优效率。同时，在稳定性方面，IMOGWO 的迭代曲线平滑，波动较小，说明其具有较强的鲁棒性。

系统优化前后的节点电压分布情况如图 4 -11 所示。

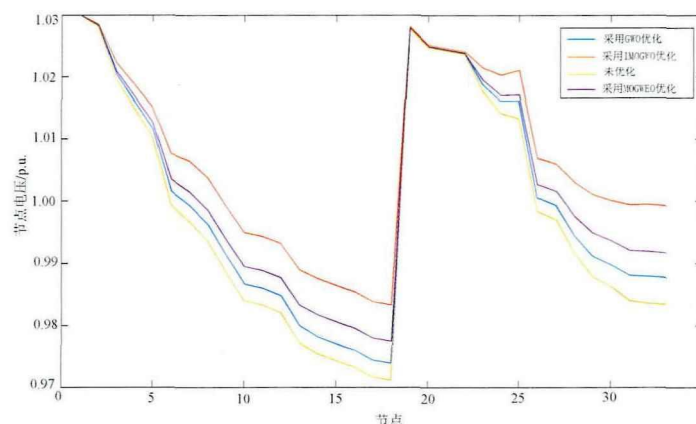


图 4-11 优化前后节点电压曲线

从图 4-11 可以看出，未优化时系统电压降幅较大，部分节点电压低于 0.93 p.u.，电能质量较差。对比算法 MOEO 与 GWO 优化后部分节点电压仍低于 0.95 p.u.，且存在局部电压越限风险。然而，IMOGWO 优化后所有节点电压均提升至 0.95p.u.以上，且未出现电压越限现象，在提升电压水平的同时，保证了电压稳定性，从而有利于系统的安全可靠运行。

无功功率在线路上的流动会引起网络有功损耗，风电场并网以及直流馈入对网损也会有一定影响，实际系统中，风速的波动会导致实际功率输出也是波动的，为应对风速波动导致的功率输出不确定性，本文提出一种分时段优化策略来验证优化算法对网络损耗的影响，将一天 24 小时划分为 5 个典型时段，并在每个时段内分别进行无功优化。五个时段分别划分为：（1）00:00-06:00 低风

速、低负荷时段；(2) 06:00-10:00 风速上升、负荷增长时段；(3) 10:00-16:00 高风险、高负荷时段；(4) 16:00-20:00 风速下降、负荷高峰时段；(5) 20:00-24:00 风速稳定、负荷回落时段。无功优化前后系统的有功网损曲线如图 4-12 所示。

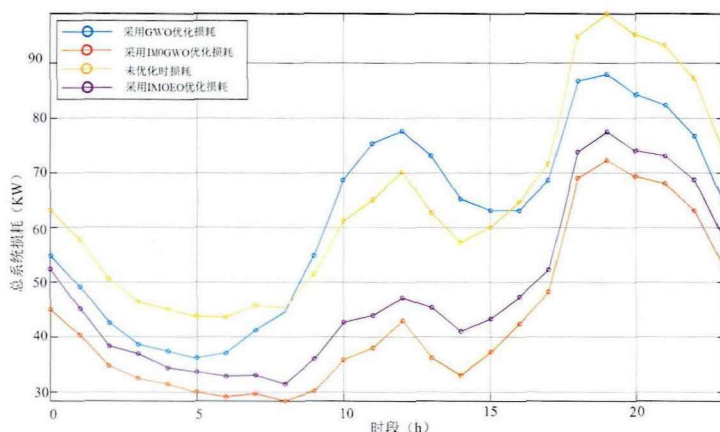


图 4-12 优化前后系统各时段网络损耗

由图 4-12 可以看出，风电场接入后，系统网损显著上升，且由于风电出力的随机性与间歇性导致潮流分布不稳定，网络损耗呈现明显波动趋势。经过无功补偿优化后，系统网损显著下降，波动幅度明显减小。经改进多目标灰狼算法 IMOGWO 优化后，网损降低幅度最大，且整体波动最小，相较之下，经典灰狼 GWO 优化后网损有所下降，但优化效果不及 IMOGWO，可见，本文提出的无功补偿方案能够有效抑制网损波动，提升系统运行经济性。

为验证改进多目标灰狼优化算法 (IMOGWO) 对新能源节点电压动态稳定性的提升效果，对优化后的含直流馈入新能源并网系统设置单相接地故障，故障从 1s 开始，持续 0.5s，观察 10s 内新能源节点电压动态响应，如图 4-13 所示。

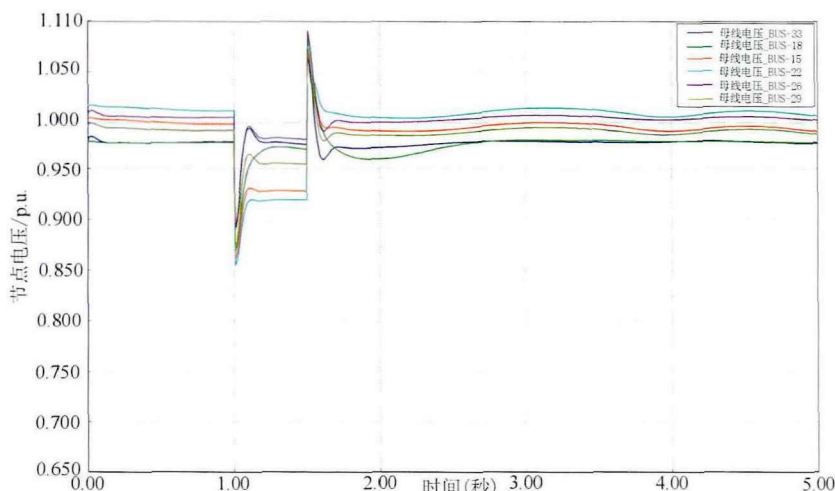


图 4-13 改进多目标灰狼算法优化后新能源节点受扰后电压波动

与图 4-9 进行对比分析,不难发现,其中优化前电压幅值最大跌落至 0.7 p.u.以下,且最大电压幅值超过 1.15p.u.;而优化后节点电压波动幅值显著减小,最大跌落抑制至 0.85 p.u.以内,且最大电压幅值降至 1.1p.u.下,且薄弱性最强的 22,18,15 三个节点的稳定性显著增强,表明 IMOGWO 算法通过协调配置无功资源有效提升了薄弱节点的暂态电压支撑能力。

4.6 本章小结

本章围绕含直流馈入的新能源并网系统薄弱点辨识与无功优化问题展开研究提出了一个改进多目标灰狼优化策略。首先,基于第三章建立的短路比指标,提出计及新能源出力随机性与直流馈入特性的节点电压脆弱度综合评估指标,实现薄弱节点的筛选与排序。在此基础上,针对多目标无功优化问题,提出一种改进型多目标灰狼优化算法(IMOGWO)。通过融合 Sobol 序列与随机反向学习策略,增强初始种群在解空间的覆盖性与多样性,并引入差分进化协同机制,通过融合差分进化的变异、交叉与选择算子,重构种群更新机制,平衡了算法的全局勘探与局部开发能力,同时,设计了非线性收敛因子动态调整策略,有效抑制了算法的早熟收敛现象。最后,以节点电压偏差最小化与综合有功网损最小化为优化目标,构建了系统约束模型。

为验证理论方法的工程适用性,基于 Matlab 平台搭建了含风电场与直流馈入的改进 IEEE 33 节点测试系统进行仿真验证。仿真结果表明:通过本文所提改进多目标灰狼优化算法(IMOGWO)优化后,系统电压波动值明显下降,网损显著减少,且优化效果显著优于经典 GWO 与 MOEO 算法,另外,优化后薄弱节点的动态电压稳定性也显著增强。该研究结果为含直流馈入的高比例新能源并网系统的无功资源协同配置与安全稳定运行提供了理论依据与技术支持。

第5章 结论与展望

5.1 结论

本文围绕含直流馈入的高比例新能源受端电网的稳定性评估与电压薄弱点辨识问题，从静态电压稳定机理分析、系统强弱评估指标构建及薄弱点辨识与无功优化三个层面展开研究，主要研究成果如下：

(1)通过建立计及新能源出力随机性与直流馈入特性的受端电网等效模型，揭示了新能源并网与直流馈入对系统电压稳定性的交互影响机制。基于网络节点导纳方程与电压稳定临界条件，推导了新能源极限渗透率的计算方法，并通过仿真验证了新能源渗透率与系统稳定性的关联性及直流馈入功率对新能源渗透率的抑制作用。该成果为新能源并网规划提供了理论依据，尤其在含直流馈入的高比例新能源受端电网场景下，量化了新能源并网规模与直流功率调制的动态平衡关系。

(2)针对传统短路比指标在直流馈入与高比例新能源接入场景下的局限性，提出了一种基于叠加定理的等效分析模型，综合考虑新能源场站间的交互作用与直流馈入对新能源节点的耦合影响，构建了新型短路比指标。通过灵敏度分析量化了节点注入功率对短路比的动态影响规律，并推导了临界短路比的理论表达式。仿真结果表明，所提指标能够有效表征新能源渗透率、直流功率与电压支撑强度之间的关联性，为含高比例新能源的交直流混联系统强弱评估提供了更精准的判据。

(3)提出了一种融合改进短路比指标与灵敏度分析的节点脆弱度综合评估方法，实现了电压薄弱节点的动态筛选与排序。针对传统优化算法易陷入局部最优的问题，设计了基于 Sobol 序列初始化与差分进化协同优化的改进多目标灰狼算法，建立了以电压偏差最小化和网损最小化为目标的无功优化模型。在含直流馈入的 33 节点系统中，所提策略能降低电压波动幅值并减少网损，验证了其在提升系统稳定性与经济性方面的有效性。

5.2 展望

尽管本文在含直流馈入的新能源受端电网稳定性评估与优化方面取得了一定成果，但受限于研究时间与数据条件，仍存在以下可深入探索的方向：

(1)本文主要聚焦静态电压稳定性，而实际系统中新能源出力与直流功率的快速波动可能引发动态电压失稳问题。未来可结合频域分析与时域仿真，研究新能源与直流混合系统的多时间尺度动态交互机制，并进一步探讨直流换相失败与新能源脱网连锁故障的协同抑制策略。

(2) 本文采用模型驱动方法,但在实际工程中新能源出力与负荷的不确定性可能影响模型精度。未来可结合数据驱动技术(如深度强化学习、数字孪生技术),构建“物理-数据”混合驱动的稳定性评估模型,利用实测数据动态修正参数并实现在线薄弱点辨识与自适应优化控制。

参考文献

- [1]韩祯祥.电力系统稳定.北京:中国电力出版社, 1995.
- [2]薛禹胜,杨明煜,蔡斌,等.电力碳减排与碳增汇路径优化的沙盘推演[J].电力系统自动化,2024,48(23):16-28.
- [3]张显,王彩霞,谢开,等.“双碳”目标下中国绿色电力市场建设关键问题[J].电力系统自动化,2024,48(04):25-33.
- [4]胡博,谢开贵,邵常政,等.双碳目标下新型电力系统风险评述:特征、指标及评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(05):1-15.
- [5]别朝红,任彦哲,李更丰,等.“双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径[J].电力系统自动化,2022,46(17):3-15.
- [6]张沈习,王丹阳,程浩忠,等.双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2022,46(08):189-207.
- [7]张玉敏,李竞锐,吉兴全,等.考虑电-碳市场决策协同的园区综合能源系统双层博弈调度[J/OL].电力系统自动化,1-22[2025-04-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240808.1340.004.html>.
- [8]吴佳琦,张谦,黄耀宇,等.计及电动汽车的综合能源系统多主体协同低碳经济调度[J].电力系统自动化,2024,48(12):36-47.
- [9]潘光胜,顾钟凡,罗恩博,等.新型电力系统背景下的电制氢技术分析与展望[J].电力系统自动化,2023,47(10):1-13.
- [10]秦婷,刘怀东,王锦桥,等.基于碳交易的电—热—气综合能源系统低碳经济调度[J].电力系统自动化,2018,42(14):8-13+22.
- [11]卫志农,张思德,孙国强,等.基于碳交易机制的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J].电力系统自动化,2016,40(15):9-16.
- [12]马瑞,袁书林,秦泽宇.考虑风电不确定性的电力系统碳排放流分析[J].电力系统自动化,2014,38(17):124-129.
- [13]印永华,郭剑波,赵建军,等.美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训,电网技术,2003,27(10):8-11.
- [14]李再华,白晓民,丁剑,等.西欧大停电事故分析.电力系统自动化,2007,31(1):1-3.
- [15]陈竟成,黄瀚.印度大停电事故分析与启示,中国电力,2012,45(10).
- [16]刘永奇,谢开.从调度角度分析8.14美加大停电.电网技术,2004,28(8):10-15.

- [17]徐式蕴,杨瑾瑜,彭龙.高渗透率光伏馈入受端电网暂态电压稳定量化评估[J/OL]. 电力系统自动化,1-17[2025-04-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20241230.0858.004.html>.
- [18]马子涵,黄萌,付熙坤,等.构网型电源接入下新能源场站的稳定运行能力评估[J].电力系统自动化,2025,49(01):38-46.
- [19]陈中,顾叮咚,郭庆.考虑全局相关性的主动配电网电压安全优化控制[J].电力系统自动化,2023,47(21):99-107.
- [20]杨博,陈义军,姚伟,等.基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述[J].电力系统自动化,2022,46(22):200-223.
- [21]陈达,朱林,张健,等.基于卷积神经网络的暂态电压稳定评估及风险量化[J].电力系统自动化,2021,45(14):65-71.
- [22]赵晋泉,汤建军,吴迪,等.直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(22):45-53.
- [23]李振,盛万兴,杜松怀,等.采用VSG的柔性配电装备交流端口电压控制及稳定性分析[J].电力系统自动化,2020,44(08):141-148.
- [24]谢季平,张文,杨浩.考虑直流调制的交直流系统中长期电压稳定协调控制[J].电力系统自动化,2019,43(22):76-83.
- [25]张聪,彭克,徐丙垠,等.直流配电系统潮流可行解与电压稳定性分析方法[J].电力系统自动化,2018,42(14):48-53.
- [26]张文朝,张博,潘捷,等.基于感应电动机网荷互馈特性的暂态电压失稳机理探析[J].电力系统自动化,2017,41(07):8-14.
- [27]中华人民共和国国家经济贸易委员会.DL755-2001 电力系统安全稳定导则[S].北京:中国电力出版社,2001.
- [28] IEEE/GIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and Classification of Power System Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004,19 (3) :1387-140.
- [29]汪娟娟,张尧,夏成军,等.交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J].电网技术,2008,32(12):30-34.
- [30]Zhou JZ, Ding Hui, Fan Shengtao, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29 (5) :2287-2296.
- [31]Ding Hui, Fan Shengtao, Zhou JZ, et al. Parametric analysis of the stability of VSC-HVDC converters[C]//Proceedings of the 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham: IEEE, 2015:1-6.
- [32]Zhou J Z, Gole AM, VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics[C]//Proceedings of the 10th IET

- International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012). Birmingham: IEEE, 2012:1-6.
- [33]高松,钟栗广,周博,王鼎,冷俊,张钰.新能源多场站短路比在改善电网电压稳定性中的应用[J]吉林电力,2021.49(06):31-35.
- [34]黄云辉,翟雪冰,刘栋,闫鹤鸣,林畅.弱电网下风力发电机组并网变流器直流电压稳定性机理分析[J].高电压技术,2017,43(09):3127-3136.
- [35] M. Cespedes and J. Sun, "Impedance Modeling and Analysis of Grid-Connected Voltage-Source Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no.3, pp.1254-1261.
- [36] ZHANG Yang, HUANG S H F, SCHMALL J, et al. Evaluating system strength for large-scale wind plant integration[C]//2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor: IEEE,2014:1-5.
- [37] The Minnesota Utilities and Transmission Companies, Minnesota Department of Commerce Minnesota renewable energy integration and transmission study[R].The Minnesota Utilities and Transmission Companies2014.
- [38] WU Di, MA Feng, JANG JN. A fast weakness analysis method for renewable energy integration[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM) Portland: IEEE, 2018:1-5.
- [39]朱凌志,曲立楠,刘纯,等.新能源发电集群的改进等效短路比计算方法[J].电力系统自动化, 2021, 45(22):74-82.
- [40]孙华东,徐式蕴,许涛,等.新能源多场站短路比定义及指标[J].中国电机工程学报, 2021, 41(2):497-505
- [41]辛焕海,董炜,袁小明,等.电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J].中国电机工程学报, 2016, 36(22):6013-6027.
- [42]辛焕海,章枫,于洋,甘德强,徐谦.多馈入直流系统广义短路比:定义与理论分析[J].中国电机工程学报,2016.36(03):633-647.
- [43]肖浩,李银红,石东源,等.适用于多馈入直流系统静态电压稳定分析的综合短路比强度指标[J].中国电机工程学报, 2017, 37(22):6471-6480.
- [44]辛焕海,甘德强,鞠平,多馈入电力系统广义短路比:多样化新能源场景[J].中国电机工程学报, 2020, 40(17):5516-5526.
- [45]赵洪山,赵莹莹.基于灵敏度技术的电网脆弱域评估,电网技术, 200832(14):54-58.
- [46]赵晋泉,江晓东,张伯明.用于静态稳定预防控制的新灵敏度分析法.电力系统自动化, 2004, 28(21):27-33.
- [47]李日波,吴政球,葛建伟,等.灵敏度法求取戴维南等效参数的静态电压稳定分析,电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6):76-80.

- [48]李国庆,王威,贾伟,等.基于负荷裕度灵敏度的电压稳定控制方法[J].电机与控制学报,2002,6(2):173-178.
- [49] Reis C, P M. A comparison of voltage stability indices[C]// MELECON 2006-2006. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. IEEE, 2006.
- [50] Canizares C A, Alvarado F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1):1-8.
- [51]王守相,王成山.基于遗传算法的电力系统电压崩溃点搜索方法Ⅲ.电力系统自动化,2004,28(23):16-20.
- [52]李国庆,王成山,王守相.基于 GPU 并行计算的电力系统电压崩溃点搜索方法 U.电力系统自动化,2012,36(15):67-72.
- [53]王锡凡,方万良,杜正春,现代电力系统分析[M].北京:科学出版社 2003.
- [54]周孝信,卢强,郭剑波,等.电力系统安全稳定导则[M].北京:中国电力出版社,2001.
- [55] Greene S, Dobson I, Alvarado F L. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997,12(1):262-272.
- [56]王成山,王守相.电力系统电压稳定性分析与控制[M].北京:科学出版社,2007.
- [57]冯治鸿,刘取,倪以信,等.多机电力系统电压静态稳定性分析--奇异值分解法:中国电机工程学报,1992(3):10-19.
- [58] Arya LD, Choube SC, Shrivastava M. Technique for voltage stability assessment using newly developed line voltage stability index. Energy Conversion & Management, 2008, 49(2):267-275.
- [59]李羽晨,王冠中,张静等.考虑光伏无功补偿的多馈入直流受端电网强度分析[J].电力系统自动化,2021:1-7.
- [60]于淼,汤亚芳,黄亦欣,等.双馈风机控制方式对继电保护影响的研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(02):180-187
- [61] Vittal, E., O'Malley, M., Keane, A.. Rotor Angle Stability With High Penetrations of Wind Generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2012,27(1):353-362.
- [62]盛四清,俞可,张文朝等.大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(06):82-90.
- [63] Cherian Mathew Ebin, Das Anandarup, Sharma Rahul. Integration of Renewable Energy Sources with LCC-HVDC System Using a New Circuit Topology with DC Fault Ride-through Capability[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(19):

4551-4561.

- [64] Pepiciello Antonio, Dominguez Garcia José Luis, Vaccaro Alfredo. The Impact of Frequency Support by Wind Turbines on the Small-Signal Stability of Power Systems[J]. Energies, 2022, 15 (22) .
- [65]汪宁渤, 马彦宏, 丁坤, 等.酒泉风电基地脱网事故频发的原因分析[J].电力系统自动化, 2012, 36 (19) :42-46.
- [66]孙华东, 张振宇, 林伟芳, 等.2011 年西北电网风机脱网事故分析及启示[J].电网技术, 2012, 36 (10) :76-80.
- [67]王峰, 刘天琪, 丁媛媛, 等.直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析[J], 电网技术, 2016, 40 (10) :3059-3065.
- [68]贺静波, 庄伟, 许涛, 等.暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J], 电网技术, 2016, 40 (6) :1839-1844.
- [69]吕敬, 董鹏, 施刚, 等.大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J], 中国电机工程学报, 2015, 35 (19) :4852-4860.
- [70]郑超, 李媛.规模化光伏并网对火电机组次同步振荡特性影响[J].电力建设 2016, 37 (9) :62-69
- [71]谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等, 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡机理与特性分析[J], 中国电机工程学报, 2016, 36 (9) :2366-2372
- [72]刘崇茹, 张伯明.直流输电系统控制参数对交直流连接母线电压幅值的影响[J].电力自动化设备, 2007, 27 (5) :23-27.
- [73]王云鹏, 韩学山, 孙东磊, 等.考虑直流输电控制方式的受端电网电压稳定性机理分析[J], 电力系统自动化, 2016, 40 (60) :35-41.
- [74] Rehman Bilawal, Rehman Atigur, Khan Wagar Ahmad, et al. Operation and Challenges of Multi-Infeed LCC-HVDC System: Commutation Failure, AC/D Power Flow, and Voltage Stability[J].Applied Sciences, 2021,11 (18) : 8637-8756.
- [75]李竹青.混合双馈入直流系统中换相失败影响分析与抑制策略[D].华北电力大学(北京), 2022
- [76]王源.直流多馈入受端电力系统暂态电压稳定评估方法研究[D].东北电力大学, 2022.
- [77]范丁中.受端电网动态无功装置优化配置方法研究[D].湖南大学, 2014.
- [78]魏俊红,张艳军,邢作霞,等.基于自适应遗传算法的分散式风电场多目标无功优化[J].东北电力技术,2016,37 (03) :1-6.
- [79]付英杰,汪泓, 谭阳红.基于 Pareto 最优解的含分布式电源配电网无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2017,29 (01) :18-23.

- [80]袁志昌,刘文华,宋强.基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J].电力系统自动化, 2009, 33 (14) :17-21.
- [81] Sapkota B, Vittal V, Dynamic VAR planning in a large power system using trajectory sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):461-469.
- [82]黄弘扬, 杨汾艳, 徐政, 等.基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功优化配置方法[J].电网技术, 2012, 36 (2) :88-94.
- [83] Ponnambalam K, Quintana V H, Vannelli A.A fast algorithm for power system optimization problems using an interior point method[J]. IEEE Trans on Power Systems,1992,7 (2) :892-899
- [84]刘明波, 李健, 吴捷.求解无功优化的非线性同伦内点法[J].中国电机工程学报 2002 (01) :2-8.
- [85]李滨、韦化, 李佩杰,电力系统无功优化的内点非线性互补约束算法[J].电力自动化设备,2010,30 (02) :53-58.
- [86]赵晋泉,居俐洁,戴则梅,陈刚.基于分支定界一原对偶内点法的日前无功优化[J]电力系统自动化,2015,39 (15) :55-60.
- [87] Farivar M, Low S H, Branch flow model: Relaxations and convexification (part I) [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (3) :2554-2564.
- [88] Taylor J A, Hover F S. Convex Models of Distribution System Reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012,27 (3) :1407-1413.
- [89]刘一兵,吴文传, 张伯明,等.基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J].中国电机工程学报,2014,34 (16) :2575-2583.
- [90]刘一兵,吴文传,张伯明,等.基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J].电力系统自动化,2014,38 (15) :58-64.
- [91]葛朝晖,王颖,刘梦怡,等.基于自适应粒子群优化算法的有源配电网多目标动态无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2018,30 (11) :44-51.
- [92]蔡博,黄少锋.基于多目标粒子群算法的高维多目标无功优化[J].电力系统保护与控制,2017,45 (15) :77-84.
- [93]吴星,刘天羽,江秀臣,等.基于改进遗传算法的海上风电场无功优化[J].电测与仪表,2020,57 (04) :108-113.
- [94]张华赢,李鸿鑫,艾精文,等.基于遗传算法的配电网无功补偿装置优化配置策略研究[J].电工技术,2020 (15) :16-20.
- [95]陈国发,张文庆,刘锋,等.基于改进蜂群算法的含 DG 配网多目标无功优化[J].智慧电力,2019,47 (03) :97-103.

- [96]孙琪,于永进,王玉彬,等.采用改进鲸鱼算法的配电网综合优化[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(05):22-29.
- [97]崔崇雨,朱瑞金,龚雪娇.采用混沌蝙蝠算法的含 DG 配电网无功优化[J].电测与仪表,2021,58(10):95-100.
- [98]Carson W Taylor. Power System Voltage Stability.中国电力出版社[M],2002.
- [99]周双喜,电力系统电压稳定性及其控制,中国电力出版社:2004.
- [100]余娟,李文沅,颜伟.静态电压稳定风险评估[J].中国电机工程学报,2009,29(28):40-46.
- [101]P.Kessel, H. Glavitsch. Estimating the voltage stability of a power system. IEEE Transactions on Power Delivery,1986,1(3):346-354.