

华北电力大学

专业硕士学位论文

大规模风电直流送出系统暂态过电压机理分
析与抑制策略研究

Mechanism Analysis and Suppression Strategy Study
of Transient Overvoltage in Large Scale Wind Power
DC Transmission System

宋明樾

2023 年 5 月

国内图书分类号：TM712
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

专业硕士学位论文

大规模风电直流送出系统暂态过电压机理分 析与抑制策略研究

硕 士 研 究 生：宋明樾

导 师：刘崇茹教授

企 业 导 师：李振动

申 请 学 位：工程硕士

专 业 领 域：电气工程

培 养 方 式：全日制

所 在 学 院：电气与电子工程学院

答 辩 日 期：2023 年 5 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM712

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Professional Master's Degree

**Mechanism Analysis and Suppression Strategy Study
of Transient Overvoltage in Large Scale Wind Power
DC Transmission System**

Candidate:	Song Mingyue
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Enterprise mentor:	Li Zhendong
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
Cultivation ways:	Full-time
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	May, 2023
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

现阶段我国风能资源与负荷中心逆向分布，能源的供给与消耗极不平衡，因此国家实施了西电东送战略，通过高压直流输电线路实现最大程度的风电消纳与远距离输送。当大规模风电送出系统发生直流故障时，送端将出现严重的暂态过电压(Transient OverVoltage, TOV)现象，甚至可能引发风机脱网或系统崩溃。因此本文从机理分析着手，提出了一种综合考虑控制系统性能和无功补偿作用的过电压抑制策略，实现了较好的抑制效果，主要工作如下：

分析了暂态过电压机理。基于含风场等效两机模型，分阶段讨论了送端母线电压的暂态变化过程，综合考虑无功转换与各控制环节的响应，探讨了换相失败与双极闭锁故障后过电压的产生原因。接着基于送端系统模型提出暂态压升的估计方法，剖析了风机过电压的产生机理和脱网机制。最后研究了风电出力、风场与换流站电气距离、风机控制方式及直流输送功率对过电压水平的抑制规律，并进行了仿真验证。

研究了直流和风机控制参数的过电压抑制作用。从机理分析中筛选与过电压密切联系的控制环节，推导比例积分系数、时间常数等控制参数对过电压水平的抑制规律。接着在两机模型仿真验证，以暂态电压越限指标及暂态过电压抑制指数为标准，并考虑参数对系统动态性能的影响后，筛选了对过电压影响最大的关键控制参数。

研究了动态无功补偿设备的过电压抑制作用。探讨静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)、静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)及同步调相机(Synchronous Condenser, SC)的作用机理并建立控制器模型，对比了各设备关键性能的优劣，调相机在无功响应能力、响应速度等方面均占有一定优势，大部分情况下更为实用。通过两机系统比较各设备不同容量时的经济成本高低及抑制能力强弱，验证了前述对性能的理论分析，并为不同场景的设备初步选择提供了一定依据。

提出了一种兼顾控制参数与动态无功补偿优化配置且基于改进帝国竞争算法联合时域仿真的暂态过电压抑制策略。在保证系统稳定运行的前提下，实现了PSCAD-PYTHON-MATLAB的数据传递与交互迭代，完成了时域仿真与优化算法的实时联合调用，得到了抑制过电压的最佳配置方案。最后基于两机模型与改进39节点模型验证了策略的有效性与通用性。该抑制策略在完善大规模风电直流送出系统的规划建设、增大线路传输容量、促进风电高效消纳、维护设

备安全与电网稳定等方面都具有极为重要的意义。

关键词：暂态过电压；控制参数调整；动态无功补偿；帝国竞争优化；软件联合调用

Abstract

At present, China's wind energy resources and load centers are inversely distributed, and the supply and consumption of energy are extremely unbalanced. Therefore, China has implemented the strategy of transmitting electricity from west to east, achieving maximum wind power consumption and long-distance transmission through high-voltage direct current transmission lines. When a DC fault occurs in a large-scale wind power transmission system, severe transient overvoltage (TOV) phenomena will occur at the transmission end, and may even cause wind turbine disconnection or system collapse. Therefore, starting from the mechanism analysis, this paper proposes an overvoltage suppression strategy that comprehensively considers the control system performance and reactive compensation, and achieves a better suppression effect. The main work is as follows:

Analyzed the mechanism of transient overvoltage. Based on the equivalent two machine model with wind field, the transient change process of the bus voltage at the sending end was discussed in stages. The reactive power conversion and the response of various control links were comprehensively considered, and the causes of overvoltage after commutation failure and bipolar locking fault were explored. Then, based on the power supply system model, an estimation method for transient voltage rise was proposed, and the mechanism of wind turbine overvoltage generation and the mechanism of wind turbine disconnection from the power grid were analyzed. Finally, the suppression law of overvoltage levels was studied based on wind power output, electrical distance between wind farm and converter station, wind turbine control mode, and DC transmission power, and simulation verification was conducted.

Studied the overvoltage suppression effect of DC and fan control parameters. Screen the control links closely related to overvoltage from the mechanism analysis, and derive the suppression law of overvoltage levels by control parameters such as proportional integration coefficient and time constant. Subsequently, through simulation and verification of the two machine model, the key control parameters with the greatest impact on overvoltage were selected based on the Track Violation Indicator and the Transient overvoltage Suppression Index, taking into account the impact of parameters on the dynamic performance of the system.

Studied the overvoltage suppression effect of dynamic reactive power compensation equipment. Exploring the mechanism of static var compensator (SVC), static synchronous compensator (STATCOM), and synchronous condenser (SC), and establishing a controller model, comparing the key performance of each device. The

condenser has certain advantages in reactive power response ability, response speed, and other aspects, and is more practical in most cases. By comparing the economic costs and suppression capabilities of different devices with different capacities in a two machine system, the theoretical analysis of performance was validated, and a certain basis was provided for the initial selection of devices in different scenarios.

A transient overvoltage suppression strategy based on improved imperial competition algorithm combined with time-domain simulation, which combines control parameters and dynamic reactive power compensation optimization configuration, has been proposed. On the premise of ensuring stable system operation, data transfer and interactive iteration of PSCAD-PYTHON-MATLAB were achieved, and real-time joint calls of time-domain simulation and optimization algorithms were completed, resulting in the optimal configuration scheme for suppressing overvoltage. Finally, the effectiveness and universality of the strategy were verified based on the two machine model and the improved 39 node model. This suppression strategy is of great significance in improving the planning and construction of large-scale wind power DC transmission systems, increasing line transmission capacity, promoting efficient wind power consumption, maintaining equipment safety, and grid stability.

Keywords: Transient overvoltage, Control parameter adjustment, Dynamic reactive compensation, Optimization based on imperialistic competitive algorithm optimization, Software joint call

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景和研究意义	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 暂态过电压机理研究.....	2
1.2.2 暂态过电压抑制措施研究.....	3
1.3 本文主要研究内容.....	6
第 2 章 大规模风电直流送出系统暂态过电压机理分析	8
2.1 暂态过电压的产生原因.....	8
2.1.1 换相失败.....	8
2.1.2 直流闭锁.....	11
2.2 换流母线与风机机端的暂态压升估算	11
2.2.1 换流母线.....	11
2.2.2 风机机端.....	13
2.3 暂态过电压的影响因素分析	14
2.3.1 风电渗透率.....	14
2.3.2 风场与换流站间电气距离.....	16
2.3.3 风机控制方式.....	17
2.3.4 直流输送功率水平.....	19
2.4 本章小结.....	20
第 3 章 控制参数对暂态过电压的抑制	21
3.1 直流控制参数.....	21
3.1.1 整流侧定电流控制环节(CCA).....	21
3.1.2 低压限流环节(VDCOL)	22
3.1.3 逆变侧换相失败预测功能环节(CFPRED).....	23
3.2 风机控制参数.....	24
3.2.1 转子侧变流器(RSC)控制环节	25
3.2.2 网侧变流器(GSC)控制环节	26
3.3 关键控制参数筛选.....	27
3.3.1 仿真验证.....	27
3.3.2 参数筛选.....	29
3.4 本章小结.....	31
第 4 章 动态无功补偿对暂态过电压的抑制	32

4.1 无功补偿技术概述.....	32
4.2 动态无功补偿设备的作用机理及其控制器模型的建立	32
4.2.1 同步调相机(SC).....	33
4.2.2 静止无功补偿器(SVC)	34
4.2.3 静止同步补偿器(STATCOM).....	36
4.3 动态无功补偿设备的性能对比	37
4.4 各设备容量与经济成本及暂态过电压抑制效果的关系	39
4.4.1 设备容量与经济成本的关系.....	39
4.4.2 设备容量与抑制效果的关系.....	39
4.5 本章小结.....	43
第 5 章 大规模风电直流送出系统暂态过电压抑制策略	44
5.1 暂态过电压抑制策略.....	44
5.2 优化模型建立.....	45
5.2.1 控制参数的优化模型.....	45
5.2.2 动态无功补偿的多目标优化模型.....	46
5.2.3 多目标优化问题的处理.....	48
5.3 基于改进帝国竞争算法的优化求解	49
5.3.1 帝国竞争优化算法.....	49
5.3.2 改进帝国竞争算法.....	53
5.3.3 基于改进帝国竞争算法的控制参数及无功补偿优化配置 ..	55
5.3.4 优化算法与时域仿真的实时联合调用	57
5.4 仿真验证.....	58
5.4.1 两机系统.....	58
5.4.2 修改后的 10 机 39 节点系统.....	61
5.5 本章小结.....	63
第 6 章 总结与展望	65
6.1 总结.....	65
6.2 展望.....	66
参考文献.....	67

第1章 绪 论

1.1 课题研究背景和研究意义

1.1.1 研究背景

新能源的大规模利用将会推动能源结构优化及能源与生态环境的可持续发展^[1]，双碳目标的提出，更是给新能源行业注入了强心剂。风电则是应用最广泛的新能源之一，具有能源丰富、环保安全、度电成本低、补贴政策优良、利用价值高等突出优势，相较其他新能源更便于进行规模化建设^[2]。我国拥有丰富的风力资源，近年来大力发展风力发电，也是世界最大的风电市场。据国家能源局统计^[3]，我国风机的发电总装机容量多年位居世界首位，目前已超过三亿 kW，是 2016 年的两倍多，是美国的近三倍，预计 2030 年风能及太阳能的总容量将超过十二亿千瓦。与此同时，我国风电市场的繁荣也推动着风力配套技术的迅速发展，风机核心组件的研发问题已被攻克，部分技术达到了世界先进水平。

目前，我国的用电中心与风能富集区整体逆向分布。东北、华北和西北地区是最大的风能资源带，也是风电的开发重心，已建成多个千万千瓦级风电基地。但三北地区的负荷需求较小，风电无法实现就地消纳，又普遍远离经济发达且用电负荷较高的华东、华中地区。导致能源的供给与消耗极其不平衡，风电的并网消纳存在问题，弃风限电现象普遍发生，严重制约了产业的可持续发展。因此国家实施了西电东送战略，颁布风电消纳政策，在风电富集区配套建设高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)通道以保证风电的大规模跨区输送。相较于交流输电，HVDC 有输电功率大、送电范围广、送电效率高、潮流可控、可实现异步联网等独特优点，无需考虑交流系统互联的功角稳定问题，且能有效规避柔直的振荡问题，非常适合电力系统联网。因此 HVDC 是风电消纳的最优方案，不仅可以满足风电大规模送出的要求，还提高了功率外送的稳定性。目前大规模风电直流送出系统的典型工程有酒湖、天中、锡泰、祁韶、鲁固直流等。

1.1.2 研究意义

基于课题的研究背景，可以明确电网在向交直流混联方向不断发展，对系统的暂态电压稳定带来巨大影响。虽然高压直流输电具有诸多优势，但也易受

系统故障影响, 受扰后导致混联系统的动态特性复杂, 影响系统稳定运行。特别在换相失败等直流故障发生后, 系统会失去原有无功平衡, 补偿装置反调助增, 整流站无功倒送, 导致送端电压迅速飙升, 峰值达 1.1p.u. 以上, 出现故障时间长达秒级尺度的暂态过电压(TOV)问题, 超过允许的电压波动范围, 威胁电网的安全稳定运行。

相比交直流混联系统, 风电因其出力波动大、功率调节能力差, 它的接入将进一步降低电网强度, 改变以同步发电机为基础的传统电网电压特性, 导致系统网架薄弱。在这样的弱送端电网中, 无功与电压的灵敏度高, 不仅在电网稳定运行时使有功无功的控制变的困难, 还会使直流故障下的暂态压升更加严重。目前多数风机的高压耐受能力很差, 难以承受过电压的影响。按照现行的《风电场接入电力系统技术规定》^[4], “当风电场并网点电压在标称电压的 90% 至 110% 之间时, 风电机组应能正常运行; 超过标称电压的 110% 时, 风电场的运行状态由风电机组的性能确定”。该指标能作为明确的电压稳定界限标准。因此实际电网中风机的最低过电压保护定值则设置为 1.1p.u., 一旦电压峰值越过此界限将无延时脱网^[5], 还可能进一步引发风电机组的连锁脱网或设备故障, 甚至导致电网崩溃。从而严重限制了高压直流输电的送电极限, 制约了风电消纳能力。据文献报道^[4], 我国已有数起风场暂态电压突增引起的系统失稳案例, 比较严重的有 2014 年西北地区某高压直流故障, 引发风场启动过电压保护, 多台风机低穿后瞬时电压升高而脱网^[6]。所以为确保大型风电可靠送出及大电网的安全稳定运行, 需要将过电压限制在 1.1p.u. 以下。

因此对于大规模风电经直流送出系统, 从原理上剖析暂态过电压问题所在, 辅以有效评价并设计可靠抑制措施, 对解决直流风机矛盾、提高风电消纳、合理利用资源、维护电网安全等方面都意义重大。目前亟待提出一种更通用有效的暂态过电压抑制策略。

1.2 国内外研究现状

为提升大规模风电直流送出系统稳定水平及风电消纳能力, 对送端暂态过电压的机理分析及抑制策略, 国内外学者进行了系列有价值的研究, 并已取得一定进展。

1.2.1 暂态过电压机理研究

(1) 在过电压的产生原因方面。主要发生在换相失败和双极闭锁故障情况下。文献[7]指出, 直流闭锁和换相失败等不同故障下暂态过电压具有不同的表

现形式,其产生过程也不尽相同。过电压现象的产生究根结底是因为故障过程中电网送端的无功不平衡,故障后的电压将显著超出正常运行范围。文献[8]深入研究了交直流系统在接地故障引发的换相失败期间及后期复原阶段的无功变化情况,提出事故后能量会向整流侧转移的观点,将严重影响送端稳定性。文献[9]研究了风火打捆直流外送系统的过电压特性,对交流故障导致的暂态电压进行了分析。另有学者对故障时送端换流站无功冗余的详细产生机理进行了研究,并探讨了影响过电压的诸多因素^[10-13]。

风力发电的接入依靠了电力电子技术,因此系统动态稳定特性将在高占比风电并入后受到较大影响,故障后电压越限的几率大幅提升。文献[14]在含高比例风机的电力系统中,研究了交流短路后过电压的产生和连锁脱网的原因,从控制系统层面制定了风场电压与无功的改良方案。文献[15]通过对鲁固直流、祁韶直流和昭沂直流算例进行的仿真,文献指出处于低压穿越过程中的风电机组也能为换相失败和交流扰动提供无功功率,因此在原有压升的基础上进一步叠加了电压升高的效果。

(2)在过电压的计算方面。部分学者研究分析了控制系统的动作过程,提出了故障扰动引发过电压的峰值计算方法。其中文献[7]的过电压峰值计算方法是从系统短路容量和无功功率展开,基于暂态电压异常现象整理了存在失稳可能性的非典型工况,所得结论可作为设备绝缘配合和系统协同控制的参考。文献[15]考虑了将风场包括在内的等值无功源,在过电压计算公式中计入了暂态变化期间分别由风场低穿和 HVDC 双极闭锁提供的过剩无功。文献[16]粗略推导了暂态过电压的计算公式,用故障时直流消耗的无功代替送端的冗余无功,再与短路容量相除,所得结果存在一定误差,但用在估算场景下比较实用。文献[12]针对计算不精确的缺陷,研究了短路比与过电压的相关性,提出了计算过电压峰值的量化解析表达式,并基于某电网 2030 年的规划数据在电力系统分析软件 PSD-BPA(Power System Department-Bonneville Power Administration)上进行了验证。文献[17]进一步讨论了以短路比为基础的计算方法,提出了一种基于视在短路比的增加指标,能定量评估混合多馈入系统参数变化对电网换相换流器高压直流输电运行特性的影响^[18]。所得结论可作为混合多馈入直流输电系统中 HVDC 容量及其馈入落点的选取提供理论指导。

已有研究对 TOV 现象的产生原因和计算方法进行了一定探讨,但在不同故障的过程梳理方面和不同因素的影响机理方面,相关文献还缺乏系统研究。

1.2.2 暂态过电压抑制措施研究

梳理现有抑制策略及其优缺点总结如下:

(1) 优化直流的控制策略及控制参数。导致 TOV 现象的根源是无功不平衡, 因此可通过直流控制策略来改良暂态过程中的无功动态性能。另外也可通过调试控制参数来提升控制环节的暂态性能, 通过建立优化模型计算得到最优的参数解集, 达到抑制暂态压升的目的, 还具有不用额外增加其他控制模块或昂贵设备的优点。文献[19]设计了一种基于恒定功率的控制策略, 主要通过调整换流器吸收的功率值、直流和电网交换的功率值, 来抑制整流侧暂态压升。文献[20]通过延迟双极闭锁的启动时间, 并调整保护系统的启动时刻, 达到了优化闭锁临停机制的目的, 研究结果表明所提策略可以与安全控制模块协同作用, 降低过压水平。文献[21]通过将换流站消耗功率对熄弧角求解偏导数, 推导了无功变化规律, 并根据优化目标提出了可以实时调整熄弧角的控制策略, 实现了讲好的压升抑制效果。文献[18]比较了直流控制系统中主要模块的主要参数, 主要模块可通过改变控制器的调节速度, 压缩直流电流的恢复时间, 如此来降低压升。文献[22]分析了相关控制模块的参数与换相失败后过电压的灵敏度关系, 所得结论为, 整流侧定电流控制模块的 PI 系数能通过降低故障时直流与送端系统交换的无功, 但其调整范围有限, 对暂态过电压特性影响不太明显^[23]。文献[24]与文献[25]则分析了逆变侧低压限流控制模块的测量时间常数, 适当调整后几乎不改变整体电网的运行特性, 且对暂态压升水平的改善效果显著。

改进直流系统的控制是从无功调整的根源来解决问题, 但无论是策略还是参数的配置, 都要兼顾电网的稳定特性, 并确保各环节运行中的相互协调。要实现合理的配置有较高难度, 调配不当甚至会导致连锁故障发生^[26]。因此在进行优化时需进行取舍^[27], 本文在后续对控制参数的讨论中综合权衡后筛选了关键参数, 尽量避免对系统稳态性能的影响, 同时也能加快算法收敛, 帮助算法准确定位全局最优解集, 寻找抑制过电压的最优参数配置。

另外, 目前多数研究仅探讨了直流系统的控制参数优化, 并把单一控制环节作为调整目标。而在故障过程中风机会对无功起到一定的控制作用, 改进风机系统的控制也能抑制过电压。鉴于风机受机组工况等约束, 单靠其控制无功的作用有限, 因此本文把风机与直流控制联合优化, 可以同时实现直流风机控制对换流站无功的共同调控作用, 解决了风机控制无功效果不佳的问题。

此外, 目前所得结论很多是基于电磁暂态的时域仿真结果, 粗略估计各参数对过电压的影响规律后给出参数的调整方向, 仍缺乏参数赋值的参考依据, 也难保证系统的稳态特性。因此本文结合了 PSCAD 时域模型的准确性和 MATLAB 优化算法的高效性, 在准确体现直流风机控制系统动态特性的同时, 保证参数优化的效率, 得到了最优配置结果。但考虑到控制参数受系统动态性能制约而调节范围有限, 具有一定局限性, 难以保证过电压的有效抑制, 通常

需要辅以其他抑制措施。

(2) 配置辅助设备。辅助设备可以通过按电网需求实时调整无功来消除 TOV 现象, 但不可避免的要考虑经济投资与已投运工程的再规划。文献[19]探讨了调相机(SC)在三种工作阶段的不同性能影响送端过电压的机制, 额定运行容量大的 SC 甚至有提高电网短路容量的作用, 以此来优化故障后的电压特性, 并给出了简单的设备容量计算方法。文献[28]的分析结果表明, 配置静止同步补偿器(STATCOM)也能够增大故障过程中的电网强度, 提升故障后再次回到稳定状态的速率, 降低了压升。文献[29]着重分析了静止无功补偿器(SVC)响应时间对风场暂态电压特性的影响, 研究结果表明静止无功补偿器的无功响应不能瞬时进行, 在时间上的延迟会引发更严重故障。提出了协调风机与静止无功补偿器出力的控制方法, 进一步增强了风场高压穿越的耐压能力。

另有文献对不同设备的性能进行了比较。文献[30]针对西北电网暂态过电压现象, 通过配置不同动态无功补偿器进行了抑制, 提出了加强无功补偿设备改造与管理、规范风机高压运行要求等建议。文献[31]把 SC 和 STATCOM 分别接入实际工程模型进行比较, 两种设备都能降低过电压峰值但效果不太相同, 都具有较多改进空间。文献[32]比较了 SC、SVC 和 STATCOM 在相同的弱送端系统中的动态无功响应情况, 筛选出 SC 在同额定容量设备中对系统的电压稳定能力最强。文献[33]为对比各装置的抑制效果提出了衡量过电压严重程度的量化指标, 对比结果也发现 SC 接入后的效果最好。并可进一步调整设备参数。

综合研究现状, 各类辅助装置不仅在降低过电压方面效果显著, 还额外能够维持电网稳定运行、提升电网强度。现有研究存在设置过电压抑制效果为单一优化目标的问题, 忽略了经济成本等其他约束。而且电压的过分降低还会引发其他连锁故障, 对问题的考虑不够周全。因此本文对动态无功补偿设备建立了兼顾抑制效果和经济成本的多目标优化模型。此外目前对装置类型与容量的选择也多以电磁暂态仿真结果作为参考, 与控制参数一样缺乏明确的配置依据, 因此本文同样借助智能优化算法与仿真结果联合调用, 以实现最佳的动态无功补偿配置。

(3) 优化风机的故障穿越机制。风机低压穿越时会提供无功, 叠加在送端会再次提升电压。为解决这个问题, 文献[34]以二阶差分理论为基础缩短了风机功率指令的时延进而抑制过电压峰值, 另外该文献还讨论了有功功率的复原时间的长短对电网无功缺乏问题的影响。文献[35]制定了在低穿时将有功维持在最高水平, 在低穿后尽快缩短恢复进程的策略。除了低穿问题, 提升高压阶段的风机穿越能力也能提升其在暂态过程中的无功支持作用, 以避免脱网。因此文献[36]在双馈风机(DFIG)控制系统中添加了转子侧电流抑制等模块, 提高了

DFIG 的高穿能力。但工程中各制造厂需要对其高低穿控制策略保密，基本无法获取真实的策略与投运效果，所以对于此类措施的研究有待进一步验证，且实际操作难度较大。

上述研究聚焦于优化直流控制、增设辅助装置及改进风机穿越机制这三类措施，对暂态过电压的抑制取得了一定成效，但在实际应用中仍存在诸多缺陷待改进。

1.3 本文主要研究内容

大规模风电直流送出系统故障后送端会出现暂态过电压，为抑制压升并规避风机脱网等风险，本文借助 PSCAD 时域仿真软件搭建典型系统，模拟实际工程的动态响应过程，分析暂态过电压现象的形成机理。接着筛选用以改善压升的控制环节关键参数，多角度比较动态无功补偿装置。最后提出一种基于改进帝国竞争算法(Imperialistic Competitive Algorithm, ICA)联合时域仿真的抑制策略，基于量化指标优化配置控制参数和动态无功补偿，抑制效果显著。本文主要研究内容分为五章，具体如下：

第一章，概述暂态过电压现象的研究背景，剖析问题的关键与后果的严重性，探讨抑制过电压的研究意义。并在机理分析与抑制策略方面，对国内外学者的研究方法和研究现状进行梳理和总结。

第二章，对暂态过电压现象进行多方面机理分析。首先搭建大规模风电经直流送出的等效两机模型，在典型故障的发展阶段基础上综合考虑直流风机各控制环节的响应情况及两机模型的仿真结果，探讨导致过电压现象的原因。接着基于详细的送端数学模型，估算在暂态过程中不同地点的压升，并考虑不同故障时无功盈余的不同来源，分析了风机机端过电压的产生机理与高压脱网机制。另外系统中风电渗透率、风场与换流站间电气距离、风机控制方式、直流输送功率水平对送端过电压的影响也不可忽视，因此接着结合实际工程与前述机理分析，推导不同因素对暂态压升的影响，并在两机模型检验后构建分析过电压抑制效果的物理场景。

第三章，通过配置控制参数抑制过电压。首先探究对故障后电压动态变化过程中起主要控制环节的作用机制，推导直流整流侧定电流控制、风机变流器控制等五个控制模块的参数对过电压的抑制规律。接着基于两机模型验证规律，其中采用暂态电压越限指标评估过电压的严重程度。并依据暂态过电压抑制指数衡量优化后的综合抑制效果，兼顾参数对系统其他动态性能的影响后，以量化指标筛选抑制效果最优的作为关键控制参数。

第四章，通过配置动态无功补偿设备抑制过电压。从无功补偿技术的发展

概述着手，探讨调相机、SVC 与 STATCOM 三种动态无功补偿设备抑制过电压的机理，搭建相应控制器模型，比较三种设备关键性能的优劣。为验证前述理论并实现设备基于单目标的初步选择，最后以各设备容量为变量比较了各设备经济成本和抑制效果的变化趋势。

第五章，结合前述控制参数与动态无功补偿的研究，提出一种基于改进 ICA 联合时域仿真的大规模风电直流送出系统暂态过电压抑制策略。在满足系统动态性能约束并保证系统稳定运行的前提下，基于所提量化指标，进行控制参数的单目标优化配置与动态无功补偿的兼顾抑制效果与经济成本的多目标优化配置，分步消除暂态过电压，提高大规模风电直流送出系统的安全稳定运行水平。最后在两机模型与改进 39 节点模型对所提策略进行算例测试，计算仿真结果表明策略可靠且有效。

第六章，总结全文内容和主要研究成果。分析存在的不足，指出进一步研究的方向，提出展望。

第2章 大规模风电直流送出系统暂态过电压机理分析

2.1 暂态过电压的产生原因

西北和华北地区典型的大规模风电外送模式通常是汇集多个传统电厂与风场后，再经由大容量 HVDC 通道集中跨区输送至东部地区。根据无功与电压关系的局域性，可选取直流送端换流母线电压表征送端近区的暂态过电压水平。因此为了机理分析方便，可将实际系统等效为两机系统，如图 2-1 所示。包括风电场、HVDC 输电系统和送受端等值交流系统等。

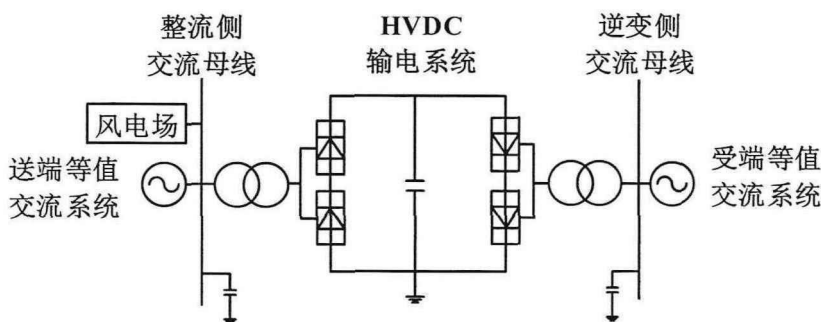


图 2-1 大规模风电直流送出系统的等效两机系统

本文将主要以两机系统为研究模型，分析送端暂态过电压的机理。使用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件作为算例搭建平台，并采用已投运大规模风电直流送出实际系统的典型参数。直流额定电压等级 $\pm 800\text{kV}$ ，额定功率 5000MW ，送受端交流母线电压 525kV 。直流的控制系统参考国际大电网会议(CIGRE)标准测试模型。在送端母线处装设 5MW 的双馈风力发电机(DFIG)共 600 台，模型参数参考文献[37]。本节将具体探讨换相失败与直流闭锁后送端 TOV 现象的产生原因。

2.1.1 换相失败

换相失败发生在逆变侧，按故障阶段划分如下：

(1) 直流电流升高阶段

逆变侧三相接地会引发逆变器换相失败，逆变器上下两个桥臂的阀同时导通，等效于阀直流侧短路和交流侧开路，直流电流 I_d 处于升高阶段，如图 2-2 a) 所示。另外换流阀导通后熄弧角会瞬时减至 0 ，换相失败预测功能(CFPRED)环节会响应以增加熄弧角，从而提升换相裕度，防止连续换相失败^[16]。

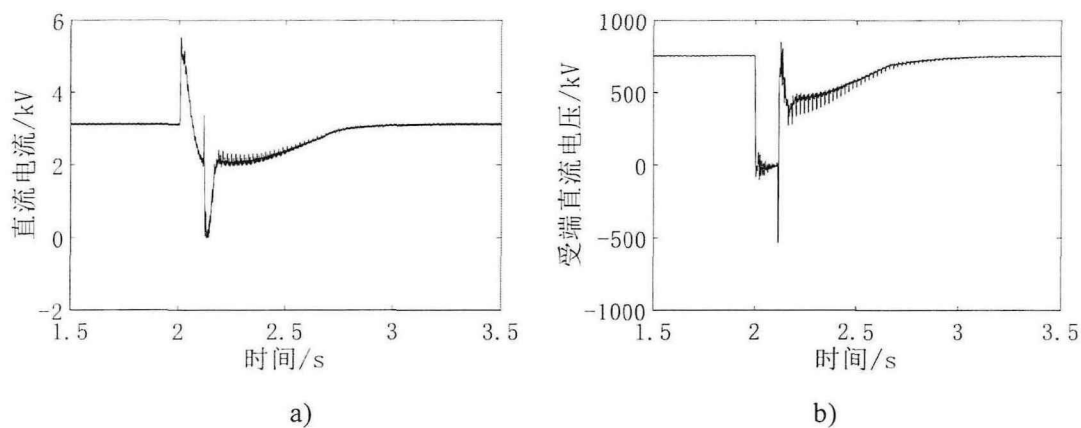


图 2-2 换相失败后的直流电流与受端直流电压

与此同时，扰动发生瞬间受端交流电压 U_2 快速跌落，由式(2-1)，受端直流电压 U_{d2} 随之下降，如图 2-2 b)所示。

$$U_{d2}=1.35U_2 \cos \beta +(3/\pi)X_{C2}I_d \tag{2-1}$$

$$Q_d=U_{d1}I_d\sqrt{1-(\cos \varphi_1)^2} \tag{2-2}$$

式中 β ——超前触发角；
 I_d ——直流电流；
 X_{C2} ——逆变站换相电抗；
 φ_1 ——送端功率因数角。

由于 I_d 已到达较高水平，而送端直流电压 U_{d1} 还未受到故障影响，由式(2-2)，整流站消耗的无功 Q_d 增加，如图 2-3 a)所示。系统稳态时主要由交流滤波器组与并联电容器组提供整流站所需的无功，而此时这两类设备因速动性不足，无法瞬时动作提供足够无功。因此送端交流系统要向整流站供给无功，导致送端换流母线电压 U_1 下降，暂态低电压出现，如图 2-3 b)所示。

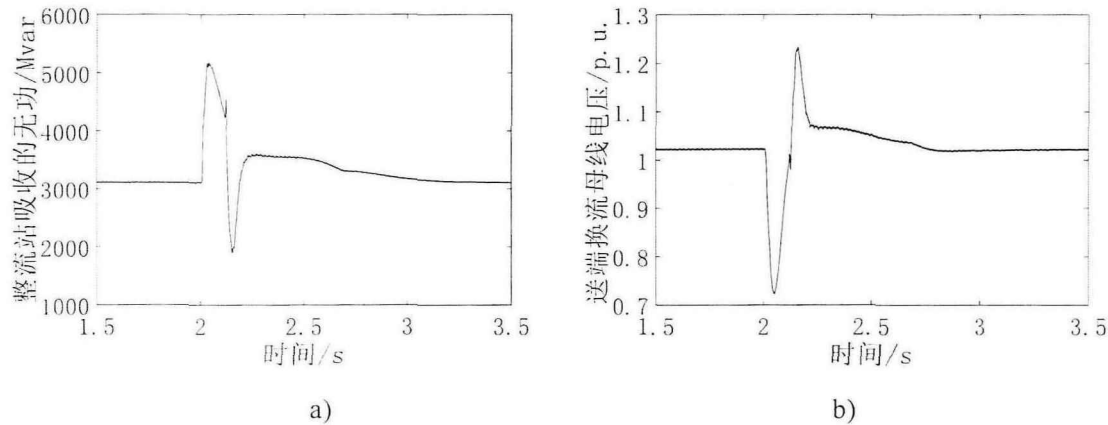


图 2-3 换相失败后整流站吸收的无功与送端换流母线电压

因此由式(2-3), U_{d1} 随之下落, 如图 2-4 a)。

$$U_{d1}=1.35U_1 \cos \alpha-(3/\pi)X_{C1}I_d \quad (2-3)$$

式中 α —— 触发角;

X_{C1} —— 整流站换相电抗。

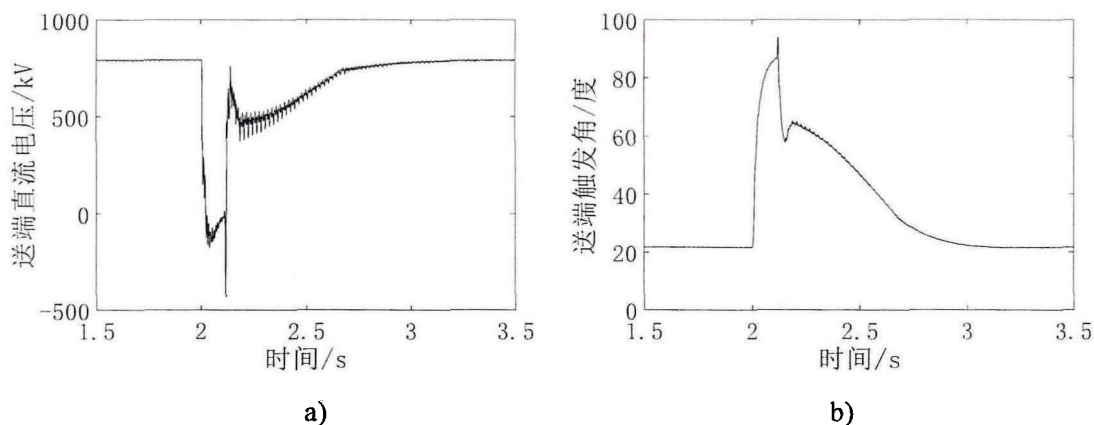


图 2-4 换相失败后的送端直流电压与送端触发角

(2) 直流电流降低阶段

为抑制第一阶段 I_d 的升高, 整流侧定电流控制环节(CCA)启动来增大送端触发角 α , 如图 2-4 b)所示, α 大致由稳态时的 20 度作用移相到近 100 度以降低 I_d 。

另外由于第一阶段直流电压值的跌落与 I_d 的升高, 低压限流环节(VDCOL)也会响应来减小 I_d 指令值。 I_d 指令值减小会增大 CCA 环节在故障时的输入量, 引发电流的过度超调, 因此 I_d 降低后还会出现过小的情况, 如图 2-2 a)。在此过程中控制环节存在不可避免的时延, 因此从图 2-2 a)与图 2-4 b)中可见当触发角开始上升时, I_d 仍在持续升高。在动作时延结束时, I_d 达到峰值, 随后开始降低, 故障进入了直流电流降低阶段。

I_d 减小后, U_{d1} 还未来得及变化, 整流器的无功需求 Q_d 已经大幅减少, 如图 2-3 a)。而安全控制装置因延时所以反应能力有限, 送端固定无功补偿装置不能及时退出, 仍持续发出为直流有功 40%~60%的大量无功, 因此送端换流站出现过剩的无功, 大量无功甚至倒送涌入交流系统, 造成送端换流母线出现暂态过电压, 如图 2-3 b)所示。加剧送端母线压升程度的还包括近区风场脱网后的无功盈余, 对此将在 2.2 小节详细说明。

(3) 直流恢复阶段

电压、电流等指标都逐渐恢复到稳定运行水平, 整流站的无功需求上涨, 与交流系统达到新平衡, 暂态电压恢复到故障前稳态值。因此换相失败导致的

TOV 现象具有“先降低后升高”的典型特征^[25]。

2.1.2 直流闭锁

直流闭锁即为保护装置关断换流阀并切断直流电流和功率以应对直流故障^[13]。闭锁后整流站从交流系统消耗的无功 Q_d 为式(2-4)所示。

$$Q_d = P_d \frac{\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)} \quad (2-4)$$

式中 P_d —— 直流输电系统输送的有功功率；

α —— 触发角；

μ —— 换向重叠角。

可以看出 Q_d 与 P_d 和 α 都有关。直流闭锁时 α 迅速增大， P_d 快速减小，由式(2-4)， Q_d 随之减小，如图 2-5 a)所示。

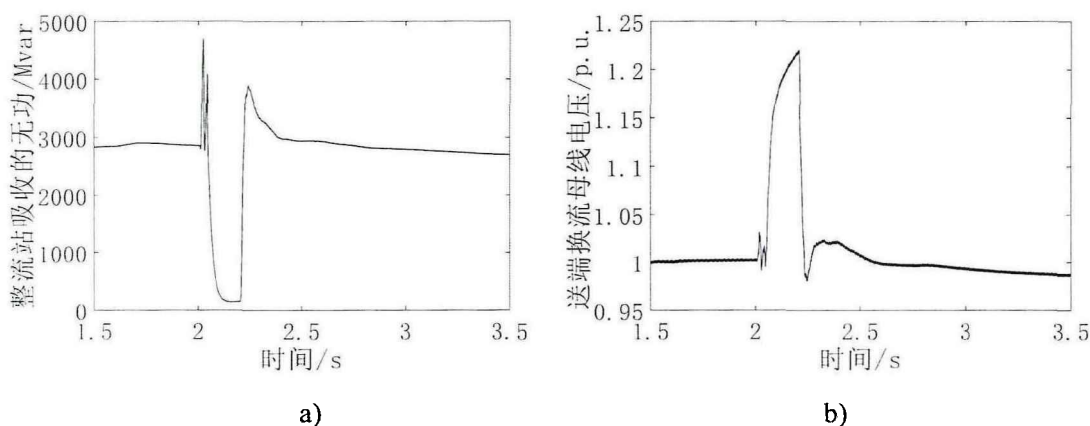


图 2-5 直流闭锁后整流站吸收的无功与送端换流母线电压

滤波器在闭锁后仍因为安控系统延时而暂未切除，输出较多无功导致送端系统无功失衡，出现暂态过电压，同样也可能导致风机高电脱网^[15]。延时结束后滤波器被切除，送端暂态电压恢复正常，如图 2-5 b)所示。因此直流闭锁导致的 TOV 现象具有“迅速升高”的典型特征，与换相失败存在明显差异。

2.2 换流母线与风机机端的暂态压升估算

2.2.1 换流母线

两机系统送端等值模型如图 2-6 所示。 U_{ac} 与 X_e 表示送端交流系统的等值电势与电抗； U_w 与 X_{w1} 表示风场等值电势和电抗； X_{w2} 表示风场并网母线与送端换流母线间的等值电抗； U_p 表示风场并网母线的相电压； U_L 为送端换流母线的线电压； P_d 表示直流传输的有功； Q_d 表示整流站消耗的无功； P_a 、 Q_a 、 P_w 、

Q_w 、 P_c 、 Q_c 分别表示从送端交流系统、风场、补偿装置注入送端母线的有功和无功。

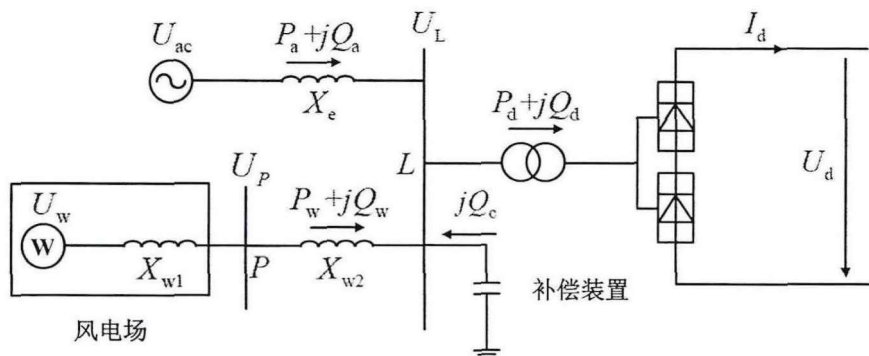


图 2-6 两机系统送端等值模型

此时送端系统等值电抗 X 可表示为式(2-5)，故障时整流侧换流母线暂态压升 ΔU_L 可表示为式(2-6)。

$$X = \frac{U_{LN}^2}{S_c} \quad (2-5)$$

$$\Delta U_L \approx \frac{\Delta Q}{U_{LN}} X \quad (2-6)$$

式中 U_{LN} ——送端母线的线电压额定值；

S_c ——送端系统短路容量；

ΔQ ——送端母线故障时的盈余无功；

整流站和风场间存在的无功平衡关系为式(2-7)所示，可知无功平衡由 Q_w 、 Q_c 、 Q_a 、 Q_d 共同维持， ΔQ 为式(2-8)所示。结合式(2-5)、式(2-6)和式(2-8)可求用标么值表示的送端暂态压升 ΔU_L^* 为式(2-9)所示。

$$Q_w + Q_c + Q_a = Q_d \quad (2-7)$$

$$\Delta Q = Q_w + Q_c + Q_a - Q_d \quad (2-8)$$

$$\Delta U_L^* = \frac{\Delta U_L}{U_{LN}} = \frac{\Delta Q}{S_c} = \frac{Q_w + Q_c + Q_a - Q_d}{S_c} \quad (2-9)$$

由式(2-9)，送端压升 ΔU_L^* 与 ΔQ 正相关且与 S_c 负相关，送端的冗余无功越多，短路容量越小， ΔU_L^* 越大。因此 Q_w 、 Q_c 、 Q_a 、 Q_d 和 S_c 均会对暂态过电压产生影响，将在 2.3 小节进一步探讨与 Q_w 、 Q_c 、 Q_a 和 S_c 都相关的风电渗透率、与 Q_w 和 S_c 相关的风机控制方式、与 Q_w 、 S_c 相关的用 X_{w2} 表示的电气距离、与 Q_d 相关的直流输送功率对 TOV 现象的影响机理。将在第 3 章与第 4 章深入探讨与 Q_w 和 Q_d 相关的直流风机控制参数、与 Q_c 相关的动态无功补偿设备对 TOV

现象的抑制作用。

2.2.2 风机机端

直流故障导致的送端母线过电压会影响送端近区风场的稳定运行，接着将分别在两种故障情形下探讨风机机端过电压的产生机理，明晰脱网机制，并估算暂态压升。

(1)换相失败故障后，根据 2.1 小节的阶段划分方式，第一阶段送端母线的暂态低电压传递至近区后，会导致有低穿功能的风场进入低压穿越状态，没有低穿功能的机组则瞬时低压脱网，这两种情况风场输出的有功都会下降。实际中多数风场配备固定电容器作为无功补偿，因速动较差无法及时切除，所以此时风场便会产生一定无功盈余，会回传给送端母线 L 后在下一阶段与 L 处交流滤波器的无功盈余共同导致送端母线过电压。

在第二阶段，送端母线过电压也会传递至风场，固定电容由于电压效应会释放更多无功，与上一阶段风场的无功盈余叠加后提高风机机端的暂态压升^[20]。因此换相失败后引发风机过电压的无功源有两个，除了第二阶段由换流站引发电压效应的风机，还包括第一阶段处于低穿或低压脱网状态的风机。若此时风机机端过电压超过了耐压限值，风机则会高压脱网，高压脱网后的风机也会产生无功盈余，不仅再次提升风场电压，还会再次反作用于换流母线。如此恶性循环，造成风机连锁脱网，更有甚者导致系统失稳崩溃。因此换相失败故障后风机机端暂态压升 ΔU_p 如式(2-10)所示。 ΔU_r 为 ΔU_L 传递到风场后风场电压的变化量，与 X_{w2} 有负相关函数关系 $\Delta U_r(X_{w2})$ 。

$$\Delta U_p = \frac{[(1 + \Delta U_r(X_{w2}))^2 - 1]Q_{w2} + Q_{w1}}{S_w} \quad (2-10)$$

式中 Q_{w1} ——低穿或低压脱网风机所发无功；

Q_{w2} ——剩余风机接收 ΔU_r 后由电压效应所发无功；

S_w ——风场短路容量。

由式(2-10)， ΔU_r 越大、 S_w 越小及所发无功越大，换相失败后 ΔU_p 越严重。另外由于无功在传递中的消耗， ΔU_p 会小于 ΔU_L ，因此抑制换流母线处压升，是避免风机脱网的重要方法。

(2)直流闭锁故障后，送端母线没有低电压阶段，风机也不存在低穿状态，因此过电压的无功源只包括由换流站引发电压效应的风机。送端母线会直接出现较高的电压并传递至近区风场，存在风机高压脱网风险。因此直流闭锁后风机机端暂态压升 ΔU_p 为式(2-9)所示。对式(2-11)的分析与所得规律与换相失败

基本一致。

$$\Delta U_p = \frac{[(1 + \Delta U_r(X_{w2}))^2 - 1]Q_{w3}}{S_w} \quad (2-11)$$

式中 Q_{w3} —— 风机接收 ΔU_r 后由电压效应所发无功。

2.3 暂态过电压的影响因素分析

暂态过电压在实际工程中易受多方面因素影响，本章对风电渗透率、风机与换流站间电气距离、风机控制方式及直流功率输送水平这几类主要影响因素对暂态过电压的作用进行了分析，从不同角度深入剖析电压的动态变化，可为工程前期的规划设计、辅助设备的安装配置、风机直流装置的调整改进、事故后的原因复盘提供依据与参考，也可用来构建分析暂态过电压抑制效果的物理场景，不同因素的影响规律也是机理分析的重要部分。但这些因素不易控制或调整代价较大，受地理环境、国家政策等诸多因素制约，暂不考虑作为抑制措施，仅做机理分析。

2.3.1 风电渗透率

受自身与外界条件制约，不同工程的风电渗透率，即风电出力占总出力比例的取值不一样。另外对于已投运风机，虽然机组容量固定但实际出力仍会受季节、地区等影响而经常变化，较为随机和不稳定，此时可用风电渗透率的变化来等效模拟出力的变化。因此在含风电系统中讨论 TOV 问题时对风电渗透率的研究不可忽视，其结论对系统的经济稳定运行很有意义^[32]。

随着风电渗透率升高，送端电网变得薄弱，其短路容量 S_c 与短路比均下降。同时因为 DFIG 风机无功响应能力弱、传统火电机组无功增发能力强，随风电渗透率升高，DFIG 风机无功出力 Q_w 变化不大，但同步发电机无功出力 Q_a 显著提高。为应对出力的不确定性，无功补偿设备容量及无功输出 Q_c 、 Q_{w2} 和 Q_{w3} 也会增多。由式(2-9)， S_c 的减小、 Q_a 与 Q_c 的增大都将导致换流母线暂态压升 ΔU_L 的升高。由式(2-10)和式(2-11)， Q_{w2} 和 Q_{w3} 的增大都将导致风机机端暂态压升 ΔU_p 的升高，过电压问题更严重。

为验证理论揭示的影响规律，在 PSCAD 中以图 2-1 中两机系统为算例进行仿真。本文采用直接关闭传统机组，并在同一位置用等容量 DFIG 风机代替的方法提高风电渗透率，保持系统潮流分布及传统机组旋转备用的基本不变，避免对仿真结果造成影响。设置渗透率为 40%、50%、60%、70%，分别模拟换相失败和双极闭锁，均设置在第 2s 故障，所得结果如图 2-7、图 2-8 所示。

从 PSCAD 导出故障的仿真数据，TOV 峰值结果如表 2-1 所示。

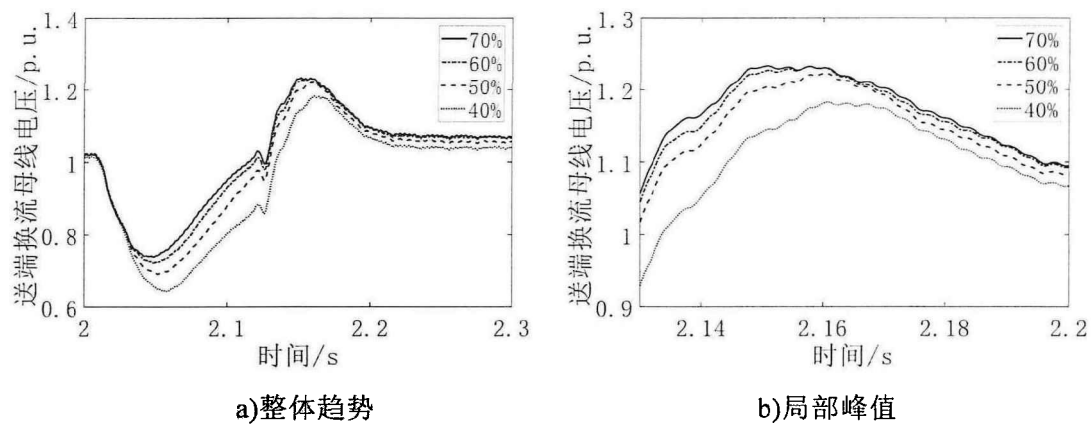


图 2-7 换相失败后不同风电渗透率下送端换流母线电压

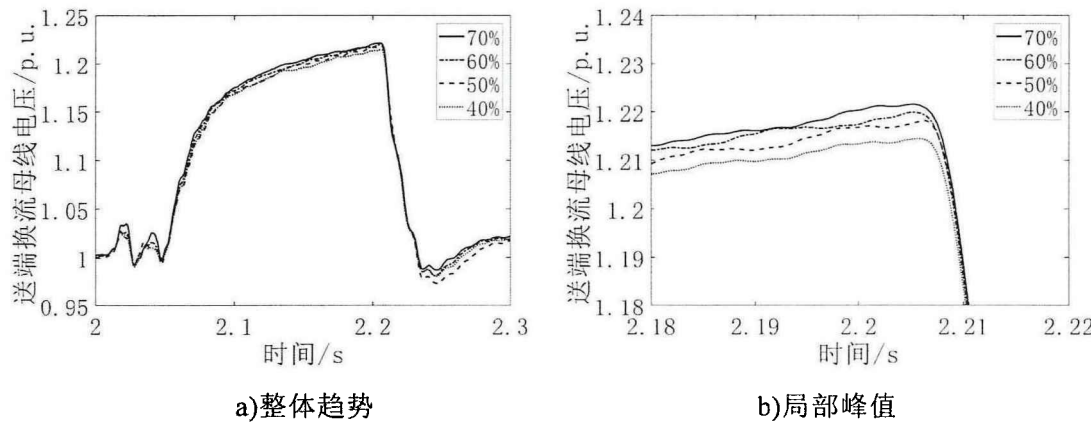


图 2-8 直流闭锁后不同风电渗透率下送端换流母线电压

表 2-1 不同风电渗透率下 TOV 峰值(p.u.)

风机渗透率	40%	50%	60%	70%
换相失败	1.1825	1.2227	1.2327	1.2332
直流闭锁	1.2157	1.2193	1.2207	1.2230

由表 2-1，随风电渗透率提升，火电出力减少，TOV 峰值将增大，两者呈正相关关系。渗透率 70%时过电压最严重，换相失败与双极闭锁的最高峰值分别为 1.2332p.u.与 1.2330p.u.，比 40%渗透率时分别上升了 4.29%与 0.60%，与前述理论分析规律一致，且换相失败后的电压变化幅度更大。伴随渗透率提升，电压稳定裕度下降，系统稳定性变差，故障切除后母线电压稳态值较初始电压值略向上波动，但过电压持续时间基本不变^[38]。

在含风电工程投运前需预先评估规划方案，根据不同渗透率下的过电压风险选择合适的风火装机配比，提高对暂态压升的钳制能力，避免投运后出现电压失稳等严重故障。

2.3.2 风场与换流站间电气距离

改变风场与换流站间的电气距离后暂态过电压会随之变化。风场距整流站距离越近，等值阻抗 X_{w2} 越小，线路损耗减少后流入送端母线无功 Q_w 越多，短路容量 S_c 不足问题越突出。由式(2-9)， Q_w 的增大与 S_c 的减小都会提升 ΔU_L 。由式(2-10)和式(2-11)， X_{w2} 的减小会提升 ΔU_p ，也会提升暂态过电压水平。

为验证理论规律，继续在两机系统仿真两类故障，设置距离为 10KM、50KM、100KM，所得结果如图 2-9 和图 2-10 所示。从 PSCAD 导出故障的仿真数据，TOV 峰值结果如表 2-2 所示。

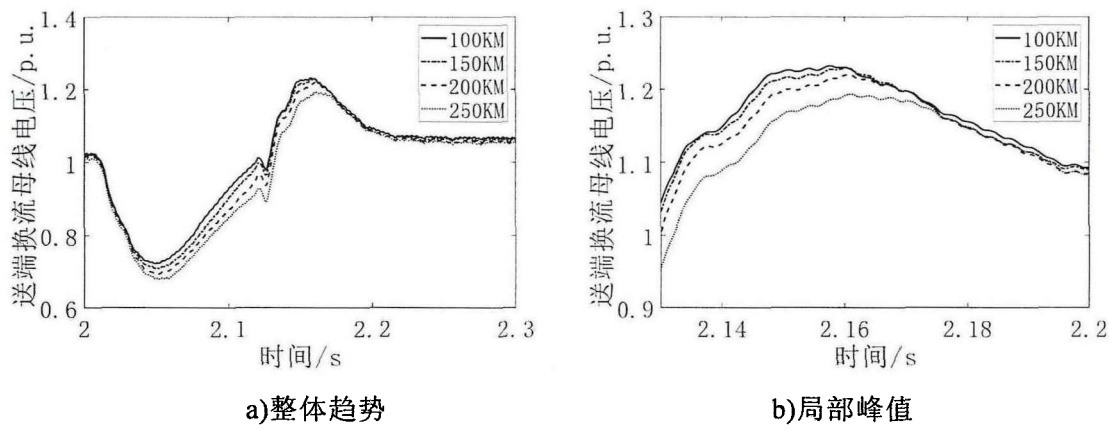


图 2-9 换相失败后不同电气距离送端换流母线电压

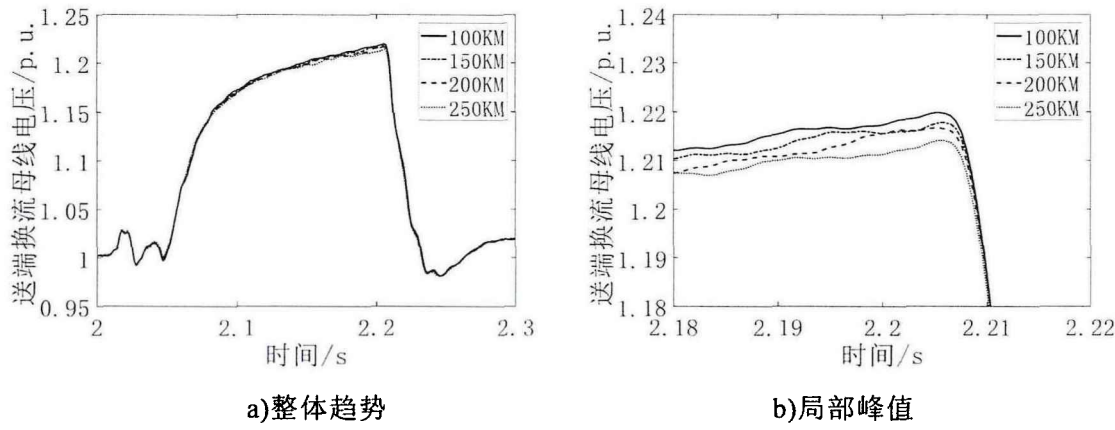


图 2-10 直流闭锁后不同电气距离送端换流母线电压

表 2-2 不同风场电气距离下 TOV 峰值(p.u.)

电气距离	100KM	150KM	200KM	250KM
换相失败	1.2327	1.2298	1.2205	1.1938
直流闭锁	1.2207	1.2191	1.2179	1.2153

由表 2-2，电气距离越近，TOV 峰值越高，两者呈负相关关系。距离为 100KM

时过电压最严重，换相失败与双极闭锁的最高峰值分别比 250KM 时提高了 3.26%与 0.44%，与理论规律一致，且变化幅度以换相失败后的更大。随距离增大，系统运行稳定性越低，但故障切除后母线电压稳态值都能稳定在初始值。但就电压的整体波动水平来说，改变距离的影响较小。

为合理规划大规模风场的建设，基于研究结果应按照距整流站距离的远近分级分类设定风机的耐压标准，提高较近风机的耐压标准或避免风机过远接入整流站，可有效降低电压大幅偏移时对风场运行的影响。

2.3.3 风机控制方式

DFIG 风机本身具有一定动态无功响应能力，根据其向电网提供无功方式的不同，将控制方式分为定无功控制与定电压控制两种，一般根据电网强弱及接入形式进行选择^[39]。单位功率因数控制是最典型的定无功控制，也是我国风机普遍采用的方式。采用定电压控制的较少，相关研究也较少。本节主要研究不同控制方式下 DFIG 风机的动态无功响应能力及对暂态过电压的影响，并考虑控制延时的作用。

DFIG 风机转子与系统的连接通过转子侧变流器(Rotor-Side Converter, RSC)和网侧变流器(Grid-Side Converter, GSC)。定无功控制时风机只发有功，当电网电压变化时，GSC 输出无功只在设定值 0 附近波动，风机对电压基本无支撑能力。而定电压控制正是通过增减风机无功出力，来稳定控制点的电压，此时 GSC 根据电网电压变化调节输出无功。因此在故障后，定电压 DFIG 会参与响应来降低暂态过电压。

此外控制延时也会影响对电压的调控作用，不考虑延时情况下，电压降低或升高时定无功 DFIG 对应发出或吸收无功，定无功 DFIG 经小幅度变化后输出无功稳定为 0，此时定电压 DFIG 稳定电压能力的优势明显。而考虑延时情况下，由于设计宽带的限制，定电压 DFIG 的控制外环存在时间延迟，GSC 输出无功整体滞后于电压变化，电压升高时 GSC 仍在发无功，对电压起到助增和反调作用^[40]。而采用定无功 DFIG 时 GSC 无功出力稳定在 0，虽然无法降低电压，但起码没有反调，此时定无功 DFIG 反而具有一定优势。

为验证上述理论，继续在两机系统仿真两类故障，分别对比定无功控制与定电压控制(无延时)、定电压控制(有延时)的情境，所得结果如图 2-11 和图 2-12 所示。从 PSCAD 导出故障的仿真数据，TOV 峰值结果如表 2-3 所示。

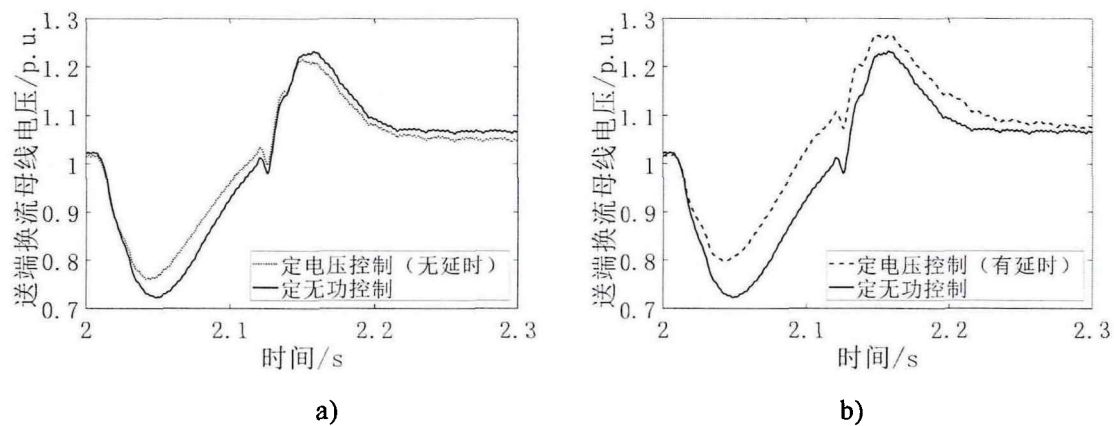


图 2-11 换相失败后不同风机控制方式下送端换流母线电压

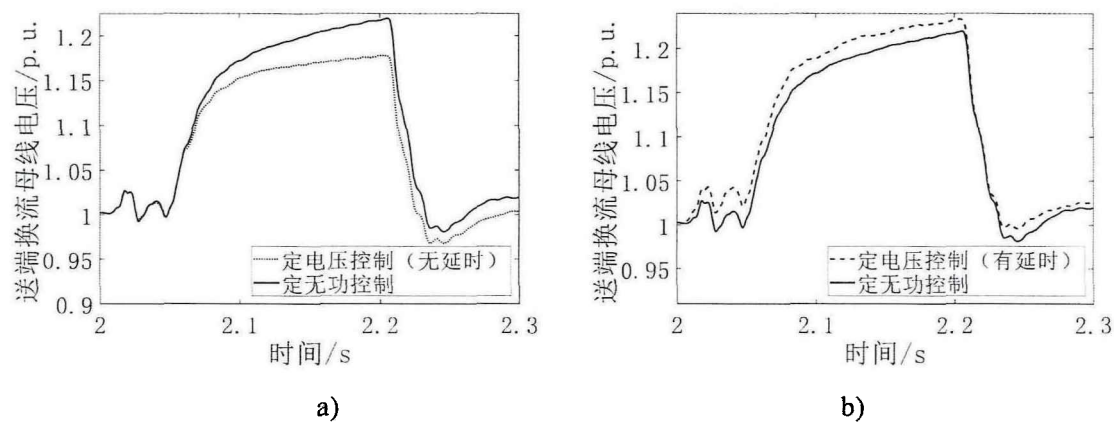


图 2-12 直流闭锁后不同风机控制方式下送端换流母线电压

表 2-3 不同风机控制方式下 TOV 峰值(p.u.)

风机控制方式	定无功功率控制	定电压控制(无延时)	定电压控制(有延时)
换相失败	1.2327	1.2153	1.2661
直流闭锁	1.2207	1.1797	1.2351

定电压控制(无延时)的 TOV 峰值最低，两种故障情况下分别为 1.2153p.u. 与 1.1797p.u.，稳定电压效果明显优于定无功。但定电压控制(有延时)的 TOV 峰值最高，分别为 1.2661p.u.与 1.2351p.u.，助增了过电压，此时二者相比定无功的电压特性反而更优，验证了前述理论。

另外定无功控制策略简单，有助于维持风机正常稳定运行，可考虑在风机低占比的系统中使用。但对于能被风电影响的风机高占比系统和孤岛系统，应考虑定电压控制，根据电压波动来调整无功出力。随风机占比的增大，也可使风机参与电压控制来维持系统稳定。因此根据变流器控制响应延时情况和风机占比情况，可为合理选择风机控制方式提供参考，一定程度上可以借助风机自身的无功调节能力，更快速有效地调整电压的变化。

2.3.4 直流输送功率水平

直流输送功率越高，为保证系统稳定运行需要更多无功^[41]，因此整流站无功补偿装置的无功输出更多 Q_c ，故障后送端换流母线的剩余无功也更多，由式 (2-9)， Q_c 的增大会导致 ΔU_L 升高，过电压更严重。为验证理论规律，继续在两机系统仿真两类故障，若直流输送功率满发为 1.00p.u.，则设置功率为 1.00p.u.、0.95p.u.、0.90p.u.、0.85p.u.，所得结果如图 2-13 和图 2-14 所示。从 PSCAD 导出故障的仿真数据，TOV 峰值结果如表 2-4 所示。

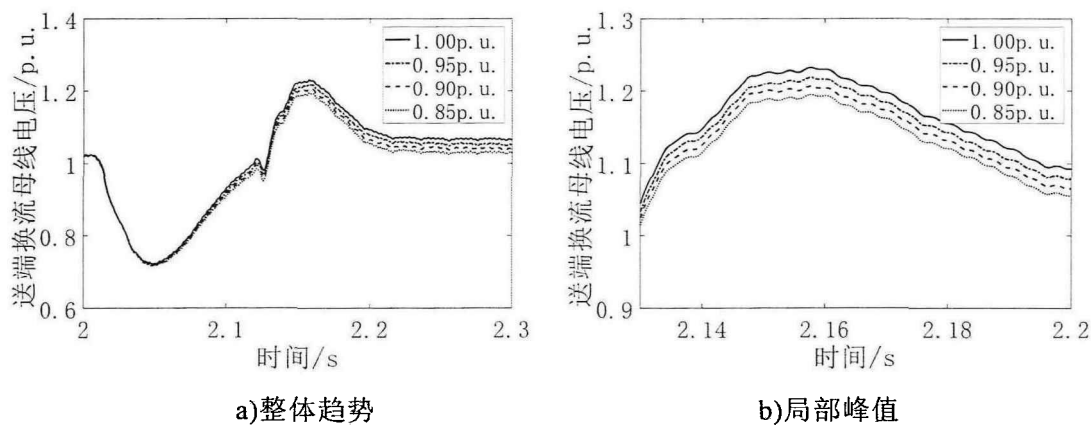


图 2-13 换相失败后不同直流功率下送端换流母线电压

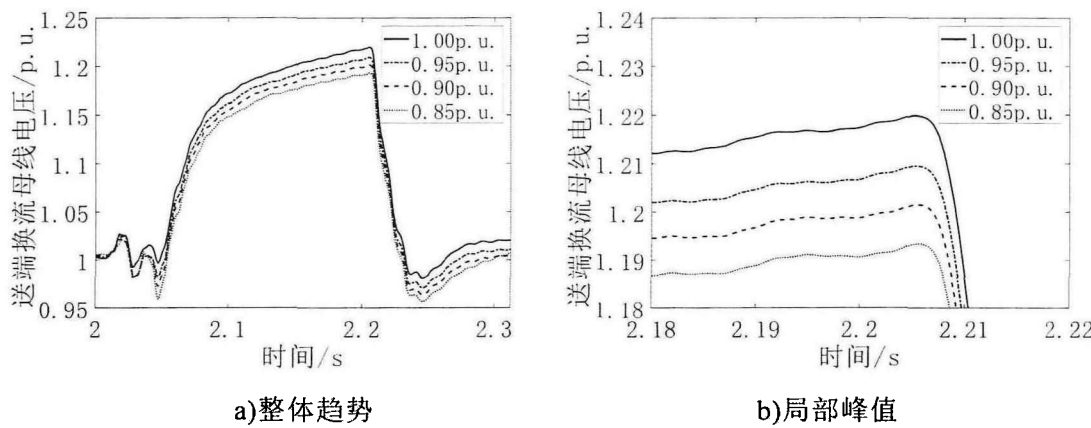


图 2-14 直流闭锁后不同直流功率下送端换流母线电压

表 2-4 不同直流输送功率下 TOV 峰值(p.u.)

直流输送功率	0.85p.u.	0.90p.u.	0.95p.u.	1.00p.u.
换相失败	1.1949	1.2064	1.2196	1.2327
直流闭锁	1.1944	1.2025	1.2103	1.2207

由表 2-4，随直流输送功率增大，TOV 峰值越大，两者呈正相关关系。功率满发(1.0p.u.)时过电压最严重，两种故障情况下最高峰值分别比 0.85p.u.时上

升 3.16%与 2.20%，与理论规律一致。随功率提升，故障切除后母线电压稳态值明显不断升高，暂态电压安全性变差，但过电压持续时间基本不变。

大规模风电直流外送系统的送端较薄弱，要维持整个系统的安全稳定，就必须控制直流输送功率在合理水平^[42]。此外直流功率对整流站无功补偿装置所发无功的影响较大，应在保证系统稳态性能的前提下，根据直流功率大小及时增减无功补偿设备或扩容降容。

2.4 本章小结

故障后的无功不平衡导致直流送端出现暂态过电压，本章对暂态过电压进行了较全面的机理分析，深入探讨了其产生原因、不同地点暂态压升及主要影响因素。

换相失败与直流闭锁是导致过电压的两种主要故障，首先按故障进程划分不同阶段后，在故障过程中对无功、电压和电流等变量的暂态变化过程及直流风机各控制环节的动态交互配合进行理论梳理和详细分析，辅以实际系统等效两机模型的 PSCAD 电磁暂态仿真结果，分阶段讨论了暂态过电压出现至消失的完整动态过程，明晰其产生机理。接着建立了含风电直流系统的详细送端模型，分别探讨换流母线和风机机端处暂态压升的估算公式，借此确定了本章第 3 小节中需要讨论的过电压影响因素，及第 3 章和第 4 章中可采取的抑制措施。接着分析了换相失败与直流闭锁两种故障情况下风机机端过电压的产生过程，探究不同故障下导致风机压升的不同无功源与引发风机脱网的机制。最后推导和揭示了风电渗透率、风场与换流站间电气距离、风机控制方式及直流输送功率水平等因素的改变对暂态过电压的影响规律，并在两机模型中逐一设置单一变量仿真来验证理论的正确性。

第3章 控制参数对暂态过电压的抑制

由第 2 章机理分析，控制系统密切参与了暂态过电压的形成过程，充分挖掘控制环节性能是解决过电压问题的一种有效途径。通过配置控制参数来抑制过电压，合理调整各参数取值就能满足期望要求，不用增加额外控制或其他设备，也能避免额外的经济成本。基于 1.2.2 小节对抑制措施现状优缺点的总结，多数研究集中在直流单一控制环节上，忽视了风机无功响应的影响。因此本章重点分析与 TOV 现象形成相关的直流和风机控制环节，推导各环节参数抑制过电压的调节方向，在含风场两机系统仿真验证，并综合考虑参数对系统动态性能的影响后筛选了抑制效果最好的关键参数。

3.1 直流控制参数

3.1.1 整流侧定电流控制环节(CCA)

整流站消耗无功 Q_d 的跌落是产生 TOV 现象的关键原因，CCA 的过调将引发 Q_d 跌落，所以对 CCA 参数的电压影响效果进行研究^[8]。CCA 是直流极控系统中最基本的控制器，也是 HVDC 系统中最广泛应用的重要控制模块。

CCA 控制框图为图 3-1，当直流电流测量值 I_{dm} 偏离指令值 I_o 时，其偏差信号经过 PI 控制器处理后得到触发角信号再传输给阀组控制级，最后输出触发角指令，控制触发角 α 来消除电流偏差，以维持直流电流 I_d 的稳定。

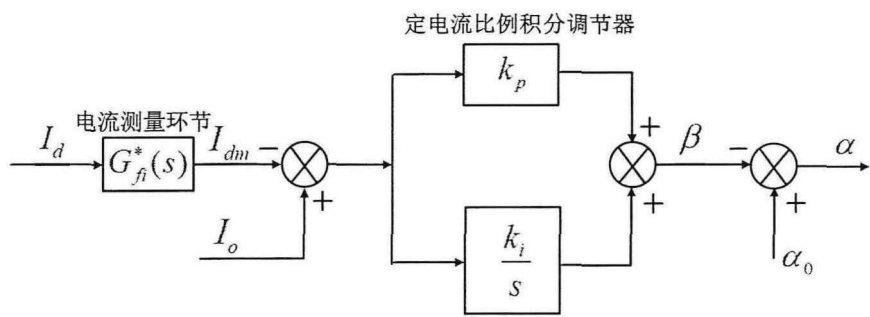


图 3-1 CCA 控制框图

直流电流的测量环节用一阶传递函数 $G_{fi}^*(s)$ 表示且 $G_{fi}^*(s)=G_i/(1+sT_i)$ ，其中 G_i 为电流增益，会把输入电流变为标么值； T_i 为电流测量时间常数，用于让不同次数谐波产生相应增益或相移； k_p 和 k_i 为比例积分调节器的 PI 系数，会影响 CCA 的调节速度，改变抑制直流电流 I_d 的快慢和过调状况^[13]。由图 3-1，可知

触发角 α 表达式为式(3-1)所示^[43]。

$$\alpha = \alpha_0 - k_p (I_o - I_{dm}) - k_i \int (I_o - I_{dm}) dt \quad (3-1)$$

式中 α_0 —— 初始触发角。

故障后因为 CCA 超调, I_o 比 I_{dm} 高, 所以根据式(3-1), 升高比例系数和积分系数后触发角 α 反而减小。为将比例积分系数的变化与送端母线暂态电压联系起来, 还需构建其中间变量的相关关系^[43], 因此基于直流的电压方程寻找到 I_d 与 α 有如式(3-2)所示的关系。

$$I_d = \frac{U_{d1} \cos \alpha - U_{d2} \cos \beta}{R_d} \quad (3-2)$$

式中 R_d —— 直流输电线路等效电阻与换流站等效换相电阻之和。

R_d 为常量, 因此在 U_{d1} 和 U_{d2} 不同取值下时, I_d 与 α 负相关, 可进一步推导换流站消耗的无功 Q_d 与 α 的关系。因此当比例积分系数增大时, 触发角 α 减小, 直流电流 I_d 升高, Q_d 增加, 送端母线盈余无功 ΔQ 降低, 由式(2-9), 送端换流母线处暂态压升 ΔU_L 减少。因此比例系数 k_p 和积分系数 k_i 均与送端换流母线处暂态压升 ΔU_L 负相关, 在一定范围内提升比例积分系数, 能压缩直流电流 I_d 的恢复时间, 最终改善暂态压升情况^[38]。不过实际上 PI 系数的改变对暂态电压的影响程度较小, 另外 PI 系数的配置不能改变电网稳定运行特性, 要兼顾多方面需求, 调整起来也有存在一定难度, 所以一般不作为优化的关键参数。

3.1.2 低压限流环节(VDCOL)

在故障后直流出现低电压的阶段, 为降低过高的直流电流, 模块会主动响应并降低直流电流指令值, 导致 CCA 模块过度超调后与 CCA 共同导致暂态过电压现象^[43]。VDCOL 模块在优化薄弱系统故障后直流的恢复特性方面表现出良好性能, 可维持系统受扰后的暂态稳定性, 促使系统运行特性的迅速恢复。

图 3-2 为 VDCOL 控制框图, 直流电压测量环节用一阶传递函数 $G_{fu}^*(s)$ 表示且有公式为 $G_{fu}^*(s) = G_u / (1 + sT_u)$, 其中 G_u 为电压增益, 会把输入电压变为标么值; T_u 为电压测量时间常数, 用于让不同次数谐波产生相应增益或相移^[25]; U_{df} 为直流电压测量值; I 为 VDCOL 输出的直流电流指令值; I_{des} 为自主控制级的电流整定值指令, 比较 I 与 I_{des} 后较小者将作为 I_o 输出, 通常是将 I 作为 I_o ; U_{dh} 和 U_{dl} 为电压上下限值; I_{dh} 和 I_{dl} 为最大最小电流指令值。

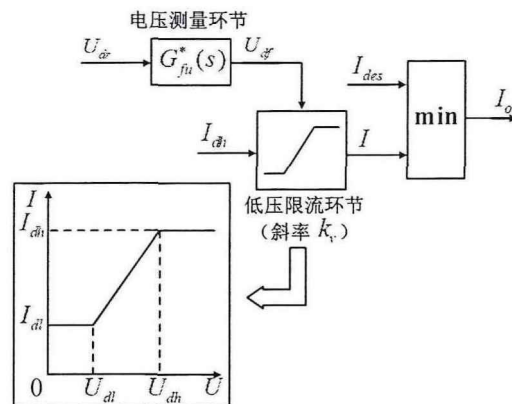


图 3-2 VDCOL 控制框图

VDCOL 特性曲线如图 3-3， U_{df} 高于 U_{dh} 时输出最大电流指令 I_{dh} ； U_{df} 低于 U_{dl} 时输出最小电流指令 I_{dl} ； U_{df} 在 U_{dh} 与 U_{dl} 间时的通过斜率 k_v 的曲线插值确定输出值。因此配置电压上下限值和最大最小电流指令值能调整低压限流模块的控制性能^[16]。但最大电流指令 I_{dh} 数值上等于逆变侧直流电流，所以不考虑对 I_{dh} 的调整，而主要探讨其他参数的抑制规律。

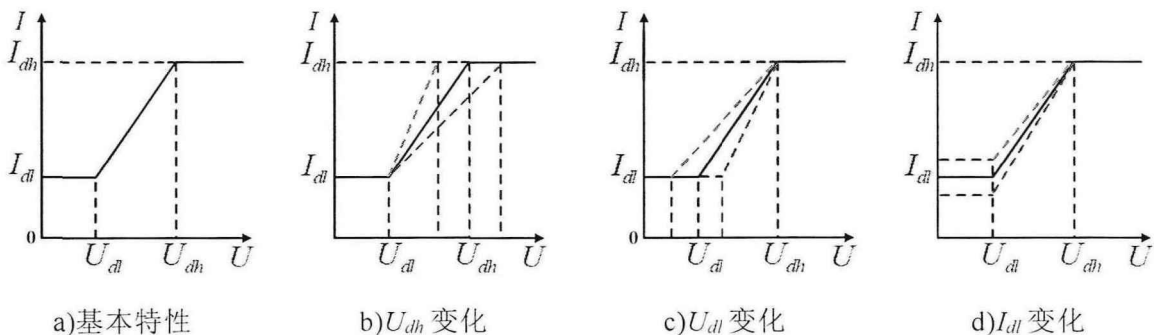


图 3-3 VDCOL 特性曲线

由图 3-3 b)，随 U_{dh} 增大，输出的直流电流指令值 I 变小，而 CCA 控制会把直流电流 I_d 降低到指令值 I 的水平，因此随 I 变小 I_d 下降幅度变大，送端母线冗余无功 ΔQ 更多，最终过电压现象更严重。因此 U_{dh} 增大时，过电压抑制效果变差， U_{dh} 减小时过程相反。由图 3-3 c)，随 U_{dl} 增大 I 变小，同理 I_d 下降幅度变大，盈余无功的增多导致过电压升高， U_{dl} 减小时过程相反；由图 3-3 d)，随 I_{dl} 增大 I 变大， I_d 下降幅度变小，盈余无功的减少会使过电压降低， I_{dl} 减小时过程相反。由图 3-2， T_u 增大， I_d 减小越慢及跌落程度减小，过电压相应降低，抑制效果更好。因此一定范围内减小 U_{dh} 和 U_{dl} 或增大 I_{dl} 和 T_u 可抑制暂态压升。

3.1.3 逆变侧换相失败预测功能环节(CFPRED)

CFPRED 控制框图为图 3-4，主要作用是检测电压降低幅度后相应增加熄

弧角，抑制换相失败的持续故障。 U_a 、 U_b 和 U_c 为直流逆变侧母线的电压，输入后经零序分量检测与 $\alpha\beta$ 变换检测来判断故障类型，经过两个检测环节后的电压值大于限值 $\Delta U_{\alpha\beta}$ 或 ΔU_0 后 CFPRED 才会响应^[25]。

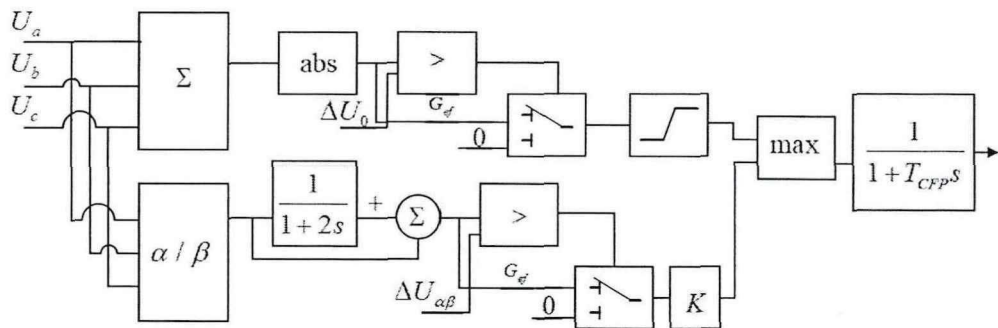


图 3-4 CFPRED 控制框图

CFPRED 中时间常数 T_{CFP} 包括 T_{CFPup} 和 $T_{CFPdown}$ 。 T_{CFPup} 是故障过程中控制熄弧角快速增加的时间常数，是 CFPRED 主要功能实现的关键，不宜作为调整对象； $T_{CFPdown}$ 是故障后控制熄弧角降低的时间常数； G_{ef} 是换相失败预测的控制增益。因此仅考虑 $T_{CFPdown}$ 和 G_{ef} 的抑制规律。增大 G_{ef} 将增大触发角的变化程度，降低暂态电压稳定性，加剧 TOV 现象。增大 $T_{CFPdown}$ 将增加 CFPRED 的调整延时，降低故障后触发角的恢复速率，进而换流站吸收的无功 Q_d 增加，送端母线冗余的无功 ΔQ 减少，提高了电压稳定性，改善了暂态过电压水平。因此一定范围内减小 G_{ef} 或增大 $T_{CFPdown}$ 可抑制暂态压升。

3.2 风机控制参数

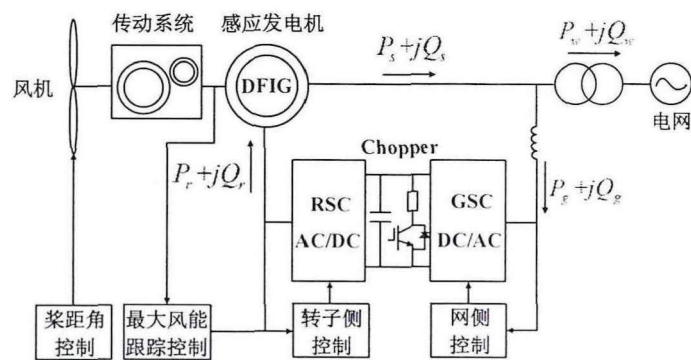


图 3-5 双馈风力发电机结构

DFIG 风机结构如图 3-5 所示，由感应发电机、物理装置、保护装置和各类控制组成。发电机定子绕组直接连接电网，而转子绕组则经过转子侧变流器(RSC)和网侧变流器(GSC)与电网连接。RSC 与 GSC 控制也是 DFIG 风机控制系统中的核心模块。

图中 P 与 Q 表示有功与无功，下标 s 、 r 、 g 、 w 分别表示从定子发出、从转子发出、GSC 从电网吸收、从风机送出。根据图中的功率流动， Q_w 包括 Q_s 和 Q_g 两部分，分别受 RSC 控制和 GSC 控制特性影响，因此探讨这两类控制模块参数对 TOV 现象的抑制规律。

3.2.1 转子侧变流器(RSC)控制环节

RSC 控制为双闭环结构，框图如图 3-6 所示，内、外环分别是电流与功率控制环。最后对转子的交轴电压 u_{qr} 和直轴电压 u_{dr} 进行派克反变换及 SPWM 调制后获得输出电压，对定子发出的 P_s 与 Q_s 进行解耦控制^[16]。还可调控发电机的转速与输出功率，在保持直流母线电压稳定方面也具有一定作用。

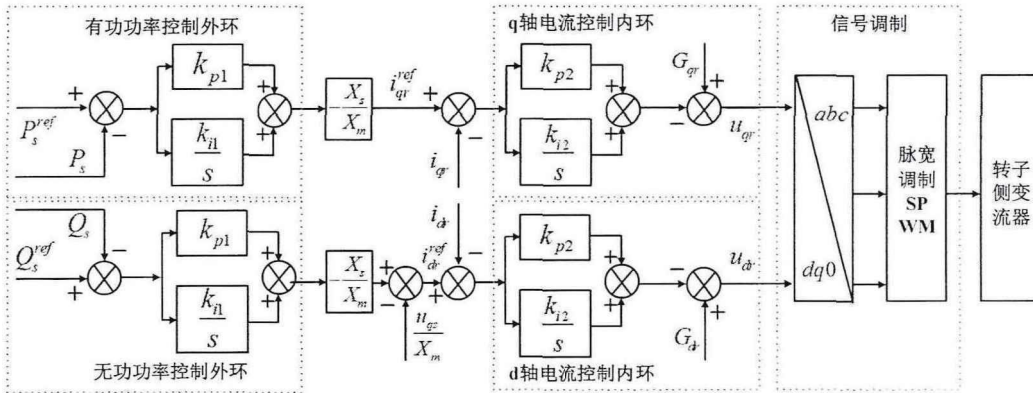


图 3-6 RSC 控制框图

图 3-6 中 P_s 和 Q_s 为定子功率实测值； P_s^{ref} 和 Q_s^{ref} 为定子功率指令值； u_{qr} 、 u_{dr} 、 i_{qr} 和 i_{dr} 为转子交直轴电压和电流实测值； i_{qr}^{ref} 和 i_{dr}^{ref} 为转子交直轴电流的指令值； u_{qz} 为定子电压的交轴分量； k_{p1} 、 k_{i1} 、 k_{p2} 和 k_{i2} 为外环和内环的比例积分系数； X_s 、 X_r 和 X_m 为定子自感、转子自感和定转子互感；函数 G_{qr} 与 G_{dr} 为式(3-3)与式(3-4)所示，其中转差率 s_w 为式(3-5)所示。

$$G_{dr} = s_w i_{qr} \left(X_r - \left(\frac{X_m^2}{X_s} \right) \right) \quad (3-3)$$

$$G_{qr} = -s_w i_{dr} \left(X_r - \left(\frac{X_m^2}{X_s} \right) \right) + \left(\frac{s_w X_m}{X_s} \right) u_{qz} \quad (3-4)$$

$$s_w = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0} \quad (3-5)$$

式中 ω_r —— DFIG 发电机转子角速度；

ω_0 —— 同步角频率，取标么值 1。

借鉴文献[43]方法对转子侧变流器控制模块进行电路等效，简化为等效电

压源串联等效转子阻抗 Z_r ， Z_r 如式(3-6)所示。对 k_{p1} 、 k_{i1} 、 k_{p2} 和 k_{i2} 求导后有 $(\partial Z_r / \partial k_{p1}) > 0$ 、 $(\partial Z_r / \partial k_{p2}) > 0$ 、 $(\partial Z_r / \partial k_{i1}) < 0$ 及 $(\partial Z_r / \partial k_{i2}) < 0$ ， Z_r 与比例系数正相关，与积分系数负相关。

$$Z_{RSCeq} = \frac{j\omega(j\omega k_{p2} + k_{i2})}{(j\omega)^2 + (j\omega k_{p1} + k_{i1})(j\omega k_{p2} + k_{i2})} - j(\omega - \omega_r) \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \quad (3-6)$$

式中 L_s —— 定子绕组自感；

L_r —— 转子绕组自感；

L_m —— 定、转子绕组互感。

定子输出无功 Q_s 与转子直轴电流 i_{dr} 关系为 $(\partial Q_s / \partial i_{dr}) > 0$ ^[44]； i_{dr} 与转子电流 i_r 关系为 $(\partial i_{dr} / \partial i_r) > 0$ ^[43]； i_r 与等效阻抗 Z_r 关系为 $(\partial i_r / \partial Z_r) < 0$ ^[45]；因此 Q_s 与 Z_r 关系为 $(\partial Q_s / \partial Z_r) < 0$ ；由 $Q_w = Q_s - Q_g$ 有 Q_s 与风场送出 Q_w 关系为 $(\partial Q_w / \partial Q_s) > 0$ ，因此 Q_w 与 Z_r 负相关。增大比例系数或减小积分系数后， Q_w 降低，由式(2-9)，换流母线处 ΔU_L 降低。因此一定范围内增大 k_{p1} 和 k_{p2} 或减小 k_{i1} 和 k_{i2} 可抑制暂态过电压。

3.2.2 网侧变流器(GSC)控制环节

GSC 控制框图如图 3-7 所示，内、外环分别是电流与电压控制环^[46, 47]，输出电压的获得与 RSC 类似。主要通过对输入电流的有效控制保持直流母线电压的稳定。

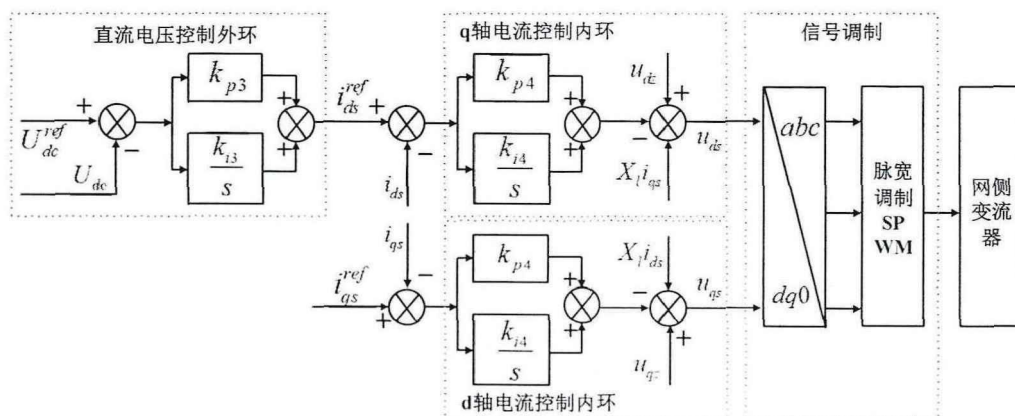


图 3-7 GSC 控制框图

图 3-7 中 U_{dc} 为直流电压实测值； U_{dc}^{ref} 为直流电压指令值； u_{qs} 、 u_{ds} 、 i_{qs} 和 i_{ds} 为电网侧交直流电压和电流实测值； i_{ds}^{ref} 和 i_{qs}^{ref} 为电网侧交直流电流指令值； u_{qs} 和 u_{ds} 为定子交直流电压； k_{p3} 、 k_{i3} 、 k_{p4} 和 k_{i4} 为外环和内环的比例积分系数； X_l 为滤波电抗值。网侧变流器等效阻抗 Z_g 对 k_{p3} 、 k_{i3} 、 k_{p4} 和 k_{i4} 求导后有 Z_g 与

比例系数正相关，与积分系数负相关。GSC 从电网吸收的无功 Q_g 与定子直轴电流 i_{ds} 关系为 $(\partial Q_g / \partial i_{ds}) > 0$ ^[44]； i_{ds} 与定子电流 i_s 关系为 $(\partial i_{ds} / \partial i_s) > 0$ ^[43]； i_s 与等效阻抗 Z_g 关系为 $(\partial i_s / \partial Z_g) < 0$ ^[45]；因此 Q_g 和 Z_g 关系为 $(\partial Q_g / \partial Z_g) < 0$ ；另外由公式 $Q_w = Q_s - Q_g$ 有 Q_g 与风场送出 Q_w 关系为 $(\partial Q_w / \partial Q_g) < 0$ ，因此 Q_w 与 Z_r 正相关。增大积分系数或减小比例系数后， Q_w 降低，由式(2-9)，换流母线处 ΔU_L 降低。因此一定范围内减小 k_{p3} 和 k_{p4} 或增大 k_{i3} 和 k_{i4} 可抑制暂态过电压。

3.3 关键控制参数筛选

3.3.1 仿真验证

前文已理论推导各控制参数对暂态过电压的抑制规律，接着在两机系统仿真验证。为衡量暂态过电压严重程度并定量反映系统电压失稳情况，结合我国实用化暂态电压可接受性判据和现行《风电场接入电力系统技术规定》^[4]，有定义如图 3-8 阴影部分和式(3-7)所示的暂态电压越限指标(Track Violation Indicator, TVI)，是综合衡量节点暂态过电压严重性的指标概念^[48]。图中虚线 $V_u(t)$ 相当于稳定界限，实线 $V(t)$ 为送端换流母线处暂态电压的变化形态，该指标越大，则 TOV 现象越严重。

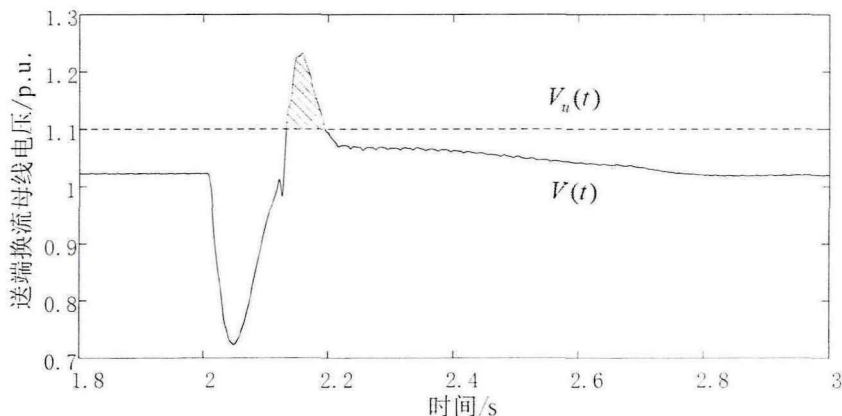


图 3-8 暂态电压越限指标 TVI 示意图

$$\text{TVI} = \sum_{k=1}^{N_k} \{ \max[V(t_k) - V_u(t_k), 0] \cdot \Delta t_k \} \quad (3-7)$$

式中 N_k —— 计算时间段的时刻离散点总数量；

t_k —— 在积分区间上按区间方向依次排布的积分离散点时刻序列；

Δt_k —— 与每个离散点对应的宽度，可结合实际需求有不同选择。

将某一参数以初始值为基准分别增大和减小百分之十，其他参数不变。以

换相失败为例，统计并计算控制参数调整后送端换流母线的 TOV 峰值和 TVI 指标，结果如表 3-1 所示。

表 3-1 调整控制参数后的仿真结果

参数	取值	TOV 峰值(p.u.)	TVI (×10 ⁻³)	参数	取值	TOV 峰值(p.u.)	TVI (×10 ⁻³)
k_p	1.08	1.23655	5.0970	k_{p1}	1.8	1.24385	5.6661
	1.20	1.23265	4.7605		2.0	1.23265	4.7605
	1.32	1.22806	4.2655		2.2	1.22196	3.8790
k_i	0.027	1.23515	5.0201	k_{i1}	0.045	1.22285	3.9630
	0.030	1.23265	4.7605		0.050	1.23265	4.7605
	0.033	1.22979	4.4875		0.055	1.24211	5.5007
U_{dh}	0.81	1.21566	3.5925	k_{p2}	1.8	1.23634	5.0789
	0.90	1.23265	4.7605		2.0	1.23265	4.7605
	0.99	1.24547	5.7924		2.2	1.22845	4.3534
U_{dl}	0.36	1.22263	3.9068	k_{i2}	0.02727	1.23048	4.5210
	0.40	1.23265	4.7605		0.03030	1.23265	4.7605
	0.44	1.24138	5.4537		0.03333	1.23511	5.0136
I_{dl}	0.495	1.25069	5.9787	k_{p3}	1.8	1.23036	4.5138
	0.550	1.23265	4.7605		2.0	1.23265	4.7605
	0.605	1.21684	3.6686		2.2	1.23475	4.9834
T_u	0.018	1.23630	5.0936	k_{i3}	0.02727	1.23376	4.8676
	0.020	1.23265	4.7605		0.03030	1.23265	4.7605
	0.022	1.22856	4.3902		0.03333	1.23137	4.6364
G_{ef}	0.18	1.22823	4.2964	k_{p4}	1.8	1.23053	4.5253
	0.20	1.23265	4.7605		2.0	1.23265	4.7605
	0.22	1.23693	5.1785		2.2	1.23505	5.0129
$T_{CFPdown}$	0.09	1.23426	4.9480	k_{i4}	0.02727	1.23399	4.8897
	0.10	1.23265	4.7605		0.03030	1.23265	4.7605
	0.11	1.23051	4.5267		0.03333	1.23123	4.6043

分析所得结果，与暂态过电压正相关的参数有 U_{dh} 、 U_{dl} 、 G_{ef} 、 k_{i1} 、 k_{i2} 、 k_{p3} 、 k_{p4} ，负相关的参数有 k_p 、 k_i 、 I_{dl} 、 T_u 、 $T_{CFPdown}$ 、 k_{p1} 、 k_{p2} 、 k_{i3} 、 k_{i4} 。减小正相关参数或增大负相关参数，TOV 峰值降低，暂态电压越限指标 TVI 降低，故障严重程度降低。仿真结果和理论分析一致，验证了抑制规律的正确

性，同时表明了合理调整控制参数来抑制暂态过电压的有效性。

3.3.2 参数筛选

前述理论与仿真均表明，在一定范围内调节控制参数可抑制暂态过电压。但控制参数对系统动态稳定性能有一定影响，为降低这种影响，在理论分析部分已筛选主要控制模块，并剔除了部分参数。因此本节将进一步精简待调整参数的数量，筛选与暂态电压变化关联程度较高的关键控制参数，在减少对系统影响的前提下获得最优的抑制效果。另外关键参数的筛选也对提高第 5 章优化算法的可靠性、降低存储内存、降低算法发散风险及尽快收敛到全局最优值具有重要作用。

通过评估暂态电压越限指标 TVI 的改善情况，可较好反映出参数调整对暂态过电压的抑制能力强弱^[48]，因此选择基于电压波形与对应 TVI 的量化指标，即暂态过电压抑制指数(Transient overvoltage Suppression Index, TSI)作为评判暂态过电压抑制能力的衡量标准。该指标通过对比控制参数调整前后的电压轨迹变化程度，反映对送端暂态过电压的抑制效果，具有一定连续性，且便于参数的优化迭代计算。TSI 指标如式(3-8)所示，该指标越大，则对过电压的抑制效果越好，且 TSI 为 1 时获得最优，TOV 现象得到完全抑制。

$$TSI=\frac{TVI(K_0)-TVI(K_0+\Delta K_C)}{TVI(K_0)}$$

(3-8)

式中 K_0 —— 控制参数初始值；
 ΔK_C —— 调整控制参数后参数的变化量。

对前述仿真结果数据进一步处理，计算 TOV 峰值相对初始峰值的变化幅度及 TSI 指标，筛选抑制效果最佳的关键控制参数，得到表 3-2。

表 3-2 调整控制参数后的仿真结果处理

参数	取值	TOV 峰值 变化(%)	TSI ($\times 10^{-2}$)	参数	取值	TOV 峰 值变化 (%)	TSI ($\times 10^{-2}$)
k_p	1.08	0.3164	-7.0686	k_{pi}	1.8	0.9086	-19.0232
	1.20	0.0000	0.0000		2.0	0.0000	0.0000
	1.32	-0.3724	10.3981		2.2	-0.8672	18.5170
k_i	0.027	0.2028	-5.4532	k_{ii}	0.045	-0.7950	16.7524
	0.030	0.0000	0.0000		0.050	0.0000	0.0000
	0.033	-0.2320	5.7345		0.055	0.7675	-15.5488

续表 3-2

U_{dh}	0.81	-1.3783	24.5359	k_{p2}	1.8	0.2994	-6.6884
	0.90	0.0000	0.0000		2.0	0.0000	0.0000
	0.99	1.0400	-21.6763		2.2	-0.3407	8.5516
U_{dl}	0.36	-0.8129	17.9330	k_{i2}	0.02727	-0.1760	5.0310
	0.40	0.0000	0.0000		0.03030	0.0000	0.0000
	0.44	0.7082	-14.5615		0.03333	0.1996	-5.3167
I_{dl}	0.495	1.4635	-25.5897	k_{p3}	1.8	-0.1858	5.1822
	0.550	0.0000	0.0000		2.0	0.0000	0.0000
	0.605	-1.2826	22.9367		2.2	0.1704	-4.6823
T_u	0.018	0.2961	-6.9972	k_{i3}	0.02727	0.0900	-2.2498
	0.020	0.0000	0.0000		0.03030	0.0000	0.0000
	0.022	-0.3318	7.7786		0.03333	-0.1038	2.6069
G_{ef}	0.18	-0.3586	9.7490	k_{p4}	1.8	-0.1720	4.9407
	0.20	0.0000	0.0000		2.0	0.0000	0.0000
	0.22	0.3472	-8.7806		2.2	0.1947	-5.3009
$T_{CFPdown}$	0.09	0.1306	-3.9387	k_{i4}	0.02727	0.1087	-2.7140
	0.10	0.0000	0.0000		0.03030	0.0000	0.0000
	0.11	-0.1736	4.9112		0.03333	-0.1152	3.2812

分析所得结果，将各控制参数调整后对应的 TSI 指标进行排序，结果如图 3-9 所示，可见参数 I_{dl} 、 U_{dh} 、 U_{dl} 、 k_{p1} 及 k_{i1} 的 TSI 指标最大，抑制效果最佳。

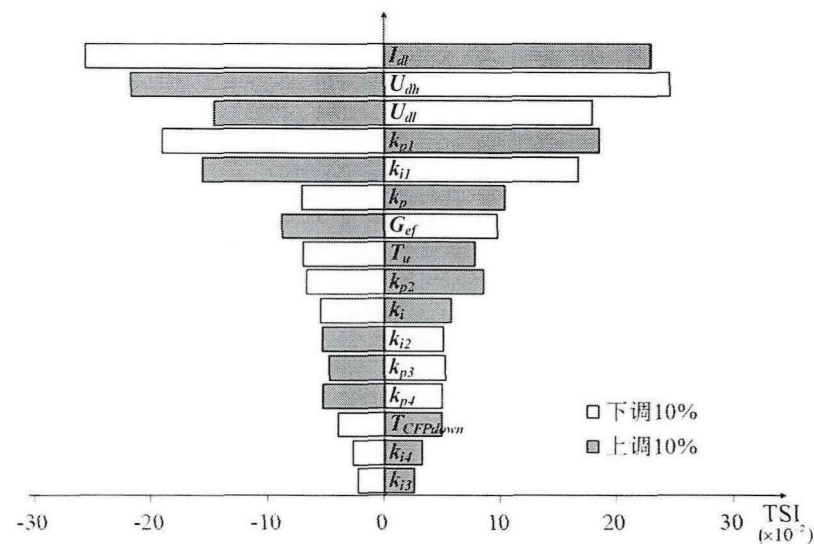


图 3-9 各控制参数调整后对应的 TSI 排序

同时参考过电压峰值变化程度，随参数 U_{dh} 、 U_{dl} 、 k_{i1} 增加与参数 I_{dl} 、 k_{p1} 减

小，TOV 峰值较初始峰值分别升高 1.0400%、0.7082%、0.7675%及 1.4635%、0.9086%。反之 TOV 峰值较初始峰值分别降低 1.3783%、0.8129%、0.7950%及 1.2826%、0.8672%，在所有参数的峰值变化中也最为显著。

因此选取 I_{dl} 、 U_{dh} 、 U_{dl} 、 k_{p1} 及 k_{i1} 作为待优化的关键控制参数。而调整其他参数不仅会影响系统性能，还在抑制暂态过电压方面有着较差的效果，因此后续只对关键控制参数进行优化^[25]。

3.4 本章小结

TOV 现象的形成与控制环节的响应密切相关，因此控制参数调整可作为抑制暂态压升的有效措施。本章首先分析了主要控制模块的功能与作用机理，推导了各环节控制参数的抑制规律。接着将暂态电压越限指标 TVI 作为过电压严重程度衡量标准，通过电磁暂态仿真验证了所得规律，结果表明 CCA 的比例积分系数、VDCOL 的电压上下限值和最大最小电流指令值和电压测量时间常数、CFPRED 的熄弧角降低时间常数和增益及风机两类换流器控制的内外环比例积分系数均能对暂态过电压起到一定抑制作用。最后进一步处理仿真结果，并依靠量化指标暂态过电压抑制指数 TSI，筛选了抑制效果最优的关键控制参数。但所有的参数调节都会受行业规程与系统动态特性的制约，因此调节范围有限，在抑制能力上具有局限性，所以常用作辅助抑制措施使用。在第 4 章将继续讨论另一种行之有效的措施，通过动态无功补偿设备实现暂态过电压的抑制目标。

第4章 动态无功补偿对暂态过电压的抑制

4.1 无功补偿技术概述

直流故障导致的暂态过电压及风机高压脱网等事故本质上还是因为系统在暂态过程中的动态无功需求无法满足。小系统通过调整发电机励磁电流就能实现对无功的补偿，但系统逐步增大后无功变化也增大，再调发电机收效甚微，此时专门的无功补偿设备应运而生。对无功进行补偿能较好稳定电压、降低损耗及维持系统安全稳定运行。因此在系统送端加装无功补偿装置能有效缓解暂态电压大幅度变化，抑制暂态过电压，同时也有利于加快故障后的恢复。

无功补偿设备分为静止与动态补偿两种。静止无功补偿设备包括并联滤波电容器和并联电抗器等，用于电网稳定状态下进行固定无功的补偿，没有自动调节能力，不能根据电压变化而同步调整。动态无功补偿设备包括 SC、SVC 和 STATCOM 等，能跟随系统需求而同步响应，快速发出或吸收连续变化的无功，实现精准补偿。随电网规模扩大，就要求无功能实现更好的实时精准补偿，另外若把动态补偿设备接入母线，还将对整个近区系统的电压稳定性都有一定改善作用，所以常接入换流母线以维持恒定电压，动态无功补偿装置因此得到广泛应用。

SC 是基于传统同步发电机进行改造，实现仅发出吸收无功的功能的设备，也是最早出现的动态补偿设备；SVC 是随电力电子技术发展后当前使用最广泛，技术最完善的设备；为克服 SC 与 SVC 的缺陷，在上世纪七八十年代产生了以变换器为基础的 STATCOM。这三类设备均可实现面向电网的动态无功支撑功能，满足特定的补偿需求^[49, 50]。现有研究主要围绕优化配置某一类补偿设备而展开，伴随多种设备的应用投产，还需着重研究补偿装置的种类选择与容量配置问题。在工程中并非补偿性能最好的设备就是最适合的，必须根据系统实际需求进行评估判断，再进行选择。

4.2 动态无功补偿设备的作用机理及其控制器模型的建立

为弥补调整控制参数对暂态过电压抑制效果的局限性，本章进一步探讨动态无功补偿设备的抑制作用，并选择常用设备调相机、SVC 和 STATCOM 作为优化配置目标。首先将从工作原理着手进行研究。

4.2.1 同步调相机(SC)

调相机是旋转设备,除了能根据系统无功需求同步响应外,还能起到增大短路容量、提高系统稳定性的作用^[32],很适合高压直流工程送端短路容量不足、输送容量大的特点,可在清洁能源跨区消纳,全网电力平衡互济中发挥重要作用。自1950年起已有多项工程在大规模新能源直流送出系统加装大容量SC设备,如瑞典、巴西等国均在整流站进行装设^[28]。我国祁韶、青豫及锡泰直流送端换流站也已经投入两台到四台不等的300Mvar调相机来维持送端电压稳定。图4-1为SC等值电路。

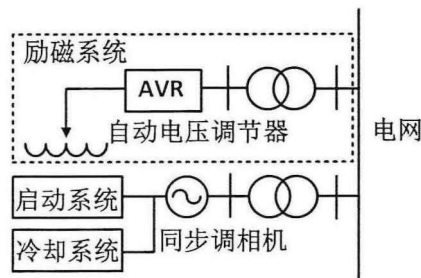


图 4-1 调相机结构

图4-2为SC的 $U-I$ 特性曲线,在 AB 段连续调节电压。正常运行时可看作可控电压源,在无功出力限制范围使用斜率控制来维持电网侧母线电压稳定,达到限值后可看作电流源。SC无功响应由自发响应和励磁系统产生的响应组成^[51]。自发响应的接入点电压仅与设备物理特性及外届电压有关,能瞬间输出无功,如式(4-1)所示。励磁系统产生的响应的接入点电压比自发响应多受励磁系统增益系数影响,因此反应有延时,如式(4-2)所示。

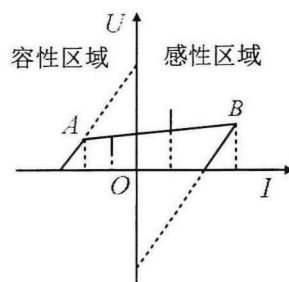


图 4-2 调相机的 $U-I$ 特性曲线

$$Q_{sc1} = (U_{T2} - U_{T1}) \left(i_{d0} - \frac{U_{T2}}{X_r + X_d^*} \right) \quad (4-1)$$

$$Q_{sc2} = (U_{T2} - U_{T1}) \left[i_{d0} - \frac{[(X_d' + X_r)(K_A + 1) - (X_d + X_r + K_A X_r)] U_{T2} (1 - e^{\frac{-t}{K_B T_{d0}}})}{(X_d' + X_r)(X_d + X_r + K_A X_r)} \right] \quad (4-2)$$

式中 U_{T1} —— 故障前网侧母线电压；
 U_{T2} —— 故障后网侧母线电压；
 X_{tr} —— 设备接入电网变压器的短路电抗；
 X'_d —— 直轴暂态电抗；
 X''_d —— 直轴次暂态电抗；
 i_{d0} —— 初始直轴电流；
 K_A —— 励磁放大倍数；
 T'_{d0} —— 初始直轴暂态短路时间常数。

因此本文 SC 控制模型如图 4-3 所示， U_T 为网侧母线电压， E_{fd} 为注入控制节点的电压。

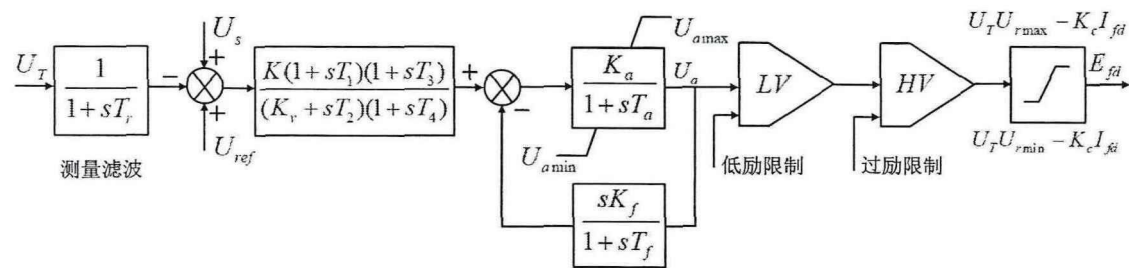


图 4-3 调相机控制系统模型

4.2.2 静止无功补偿器(SVC)

SVC 中采用半控晶闸管代替开关，通过控制晶闸管导通角度改变阻抗来补偿无功，响应迅速、技术成熟且控制特性灵活^[52]。通常由晶闸管投切电容器(TSC)、晶闸管投切电感(TSR)、晶闸管控制电抗器(TCR)、滤波电容器(FC)、可控饱和电抗器(SR)等模块组成^[40]。

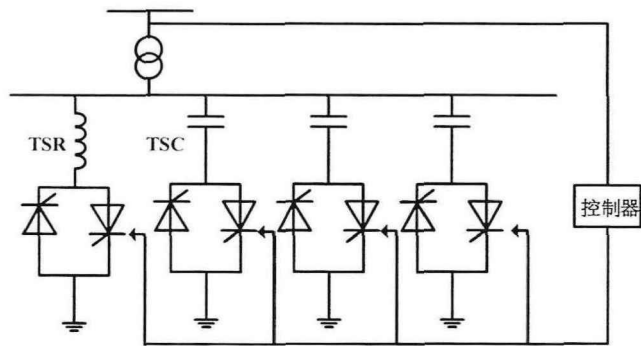


图 4-4 TSC+TCR 型 SVC 结构

其中 TSC+TCR 型 SVC 最实用，结构如图 4-4 所示。TCR 能补偿感性无功，

TSC 能补偿容性无功，避免了单独配置 TCR 容量浪费或单独配置 TSC 无功补偿不连续的缺点，实现了感容性无功的光滑调节。

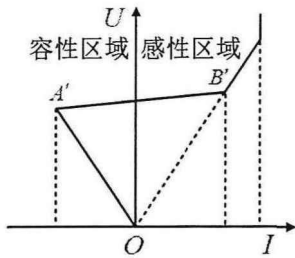


图 4-5 SVC 的 U - I 特性曲线

图 4-5 为 SVC 的 U - I 特性曲线，在 $A'B'$ 段连续调节电压^[28]。其在稳态时也可看作可控电压源，在无功调节范围内根据其斜率特性调节电压以维持电压稳定，达到限值后可看作不变阻抗，设备释放的无功与网侧母线电压平方为正比关系。因此网侧电压变化时无功补偿能力随之变化，可能导致电压恶化甚至崩溃，这也是该补偿器的主要问题所在。式(4-3)和式(4-4)分别为 SVC 在容性和感性区域的无功响应。

$$Q_{SVC} = -\frac{U_T^2}{X_{C\max}} \tag{4-3}$$

$$Q_{SVC} = \frac{U_T^2(X_{C\max} - X_{L\max})}{X_{L\max}X_{C\max}} \tag{4-4}$$

式中 U_T ——网侧母线电压；
 $X_{C\max}$ ——TSC 最大容抗；
 $X_{L\max}$ ——TSC 最大容抗。

因此本文 SVC 控制模型如图 4-6 所示， B_{SVS} 为设备输出的等效补偿导纳。

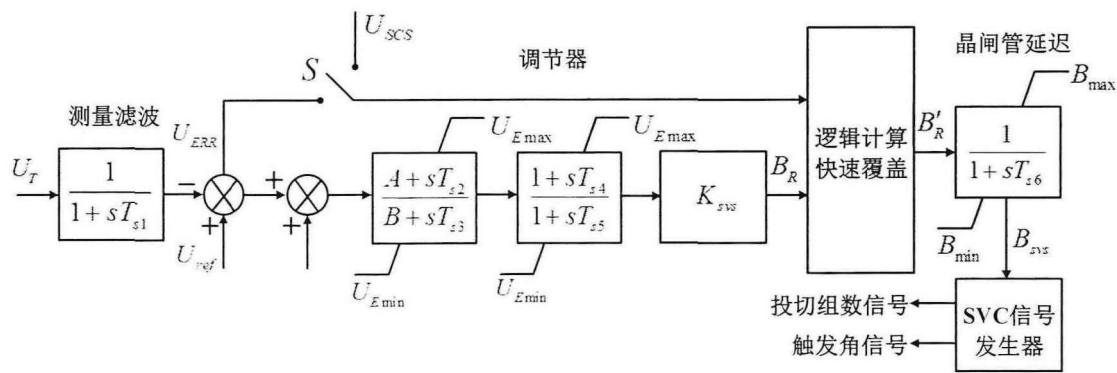


图 4-6 SVC 控制系统模型

4.2.3 静止同步补偿器(STATCOM)

STATCOM 通过对交流侧电压峰值相位的控制, 得到所需输出电流, 实现无功的连续补偿^[52]。STATCOM 结构见图 4-7, 主体为自换相电压型三相全桥逆变器, 通过交流端子连接电网。 $\dot{U}_T$ 为网侧母线电压; $\dot{U}_i$ 为设备输出电压; $\dot{i}$ 为网侧流向补偿器的电流; $\dot{U}_L$ 为 $\dot{i}$ 流过后的对应压降。补偿器通过 $R+jX$ 阻抗器连接电网, 电抗器还兼具滤除谐波功能。

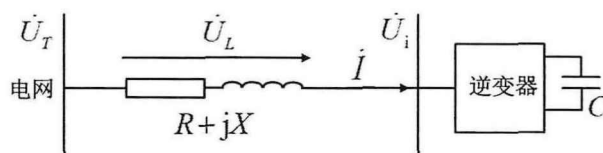


图 4-7 STATCOM 结构

理想情况下无损耗, 补偿器通过电感 X 连接电网。将图 4-7 中 $\dot{U}_T$ 等效为理想电压源, $\dot{U}_i$ 等效为可控电压源, 最终等效电路及相量图如图 4-8 所示。可知电压峰值 $U_T < U_i$ 时 $Q < 0$, 设备释放感性无功且处于容性区; $U_T > U_i$ 时 $Q > 0$, 设备吸收感性无功且处于感性区; 两电压相等时时电网与补偿器间不存在无功交换^[28]。此时调整 $\dot{U}_i$ 峰值即可实现无功的快速连续补偿^[33]。事实上损耗不可避免, 为保证设备直流侧电压恒定也需从外界吸收有功, 因此以 $R+jX$ 表示连接阻抗, 其等效电路及相量图如图 4-9。此时 $\dot{U}_i$ 落后 $\dot{U}_T$ 角度 δ , 同时调整 $\dot{U}_i$ 的峰值和相角即可控制 $\dot{i}$ 的峰值相角, 最终实现无功大小及方向的平滑调整。

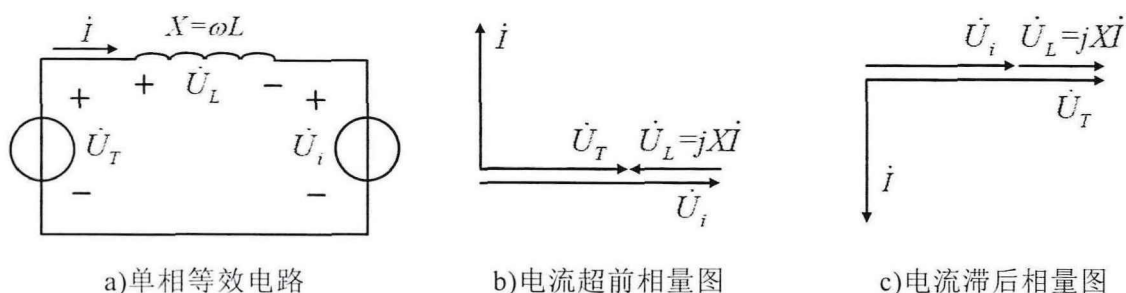


图 4-8 理想情况 STATCOM 的等效电路及相量图

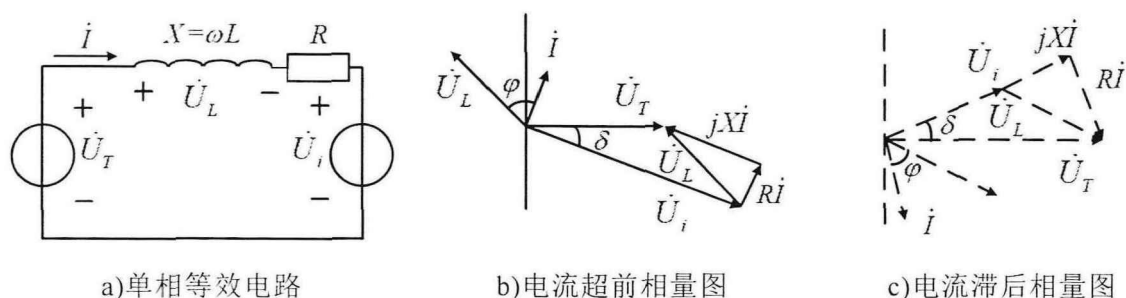


图 4-9 实际情况 STATCOM 的等效电路及相量图

STATCOM 在调节范围内同样等效为可控电压源，用以稳定网侧母线电压，超出调节限值后补偿器释放的无功与网侧母线电压成线性变化。设备的补偿能力没有完全受网侧电压限制，在电压过高过低的情况下仍可以维持电压稳定，其 $U-I$ 特性曲线如图 4-10，在 $A''B''$ 段连续调节电压。

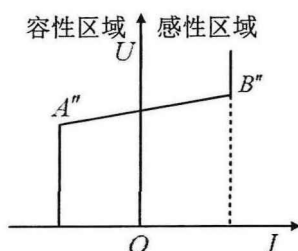


图 4-10 STATCOM 的 $U-I$ 特性曲线

设备的无功响应如式(4-5)所示。

$$Q_{STATCOM} = \frac{U_i \cos \delta - U_T}{X} U_T \quad (4-5)$$

因此本文 SVC 控制模型如本文 STATCOM 控制模型如图 4-11 所示。

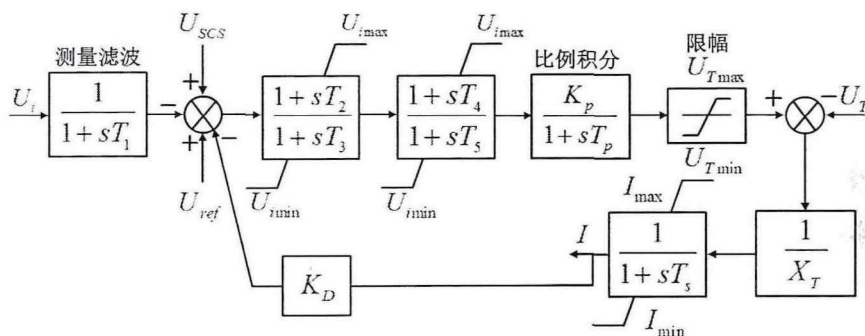


图 4-11 STATCOM 控制系统模型

4.3 动态无功补偿设备的性能对比

(1) 暂态过程的无功响应能力。暂态过电压故障后电压波动已经越过设备的调节限值，此时 SVC 无功与网侧电压平方是正比关系，无功响应能力受到较大限制；STATCOM 相比 SVC 能吸收更多的过剩无功，但设备所发无功与网侧电压呈现正比关系，其无功响应能力也会受到一定影响；只有 SC 是有源旋转设备，基本不受网侧电压影响^[50]，仍具有较强的持续吸收无功的能力，动态电压支撑能力更强，这是 SC 的重要优势。

(2) 经济成本。SVC 采用晶闸管代替开关，静态投资和运维损耗费用均较低，经济性较好；SC 的初始成本及运维损耗费用比 SVC 高 20%~30%，经济性劣于 SVC；STATCOM 采用了可关断器件，研制成本即比普通器件高，导致静

态投资高，等容量 STATCOM 的总成本约为 SVC 的 2.65 倍^[53]，经济性在三种设备中最差，电网配置不多。

(3)响应速度。SC 是与电网电磁耦合的旋转设备，能迅速应对电压的波动产生无延时的自发响应；而 SVC 与 STATCOM 基于电力电子器件构成，实现无功的输出必须有采样、运算、输出等步骤，反应较慢。虽然随着技术进步 STATCOM 的响应时间已经降低至数十毫秒，但还是比不上旋转设备的电磁耦合特性，尤其用于治理直流电压扰动时效果有限。当暂态电压变化更快或 SVC 与 STATCOM 的响应延时更长时，送端已经出现过电压，而此时设备可能仍处于滞相状态在发出无功，甚至将会加剧暂态过电压造成反调问题。而调相机因不存在响应延时，没有电压反调的问题。

(4)谐波水平。SVC、STATCOM 使用了电力电子器件，不可避免地会向系统注入谐波。SC 是基于电磁场的能量转换，输出波形通常较为理想，可有降低装置发出的谐波含量。

表 4-1 动态无功补偿设备性能对比

性能	同步调相机	SVC	STATCOM
设备类型	旋转设备	静止设备	静止设备
补偿范围	容性/感性	容性/感性	容性/感性
补偿连续性	连续	连续	连续
无功响应能力	基本不受电压影响	与电压平方成正比	基本与电压成正比
经济成本	较高	中	高
响应速度	快	较慢	较快
谐波水平	无	多	少

表 4-1 为动态无功补偿设备的性能比较。SC 在暂态无功补偿能力、谐波水平及响应速度方面都具有优势，但也存在有功损耗大、维护费用高等问题；SVC 成本较低且技术成熟，但具有电压调节能力较差、响应速度较慢和谐波污染大的缺点；STATCOM 在暂态无功补偿能力、可控性能和动态响应速度等方面优于 SVC，但也存在技术要求高、工程造价高的缺点。

理论上来说，SC 对短时暂态过电压的抑制能力更具优势，SVC 和 STATCOM 对稳态电压波动的支撑能力更强。不同动态无功补偿设备的性能特点各有优劣，具体如何配置还得根据电网实际需求来确定。

4.4 各设备容量与经济成本及暂态过电压抑制效果的关系

4.4.1 设备容量与经济成本的关系

设备的经济成本包括固定成本和可变成本。固定成本又包括投资成本、装机成本等，可变成本包括运行成本、维护成本等。如式(4-6)所示，设备容量与单位容量经济成本不成线性关系。

$$C_D = \lambda_1 s_D^2 - \lambda_2 s_D + \lambda_3 \quad (4-6)$$

式中 C_D ——设备的单位容量经济成本，单位为元/kVar；

s_D ——设备的总运行容量，单位为 MVar。

依据动态补偿设备的经济化函数^[54-56]，得到三种设备容量与成本的关系表达式如式(4-7)、式(4-8)和式(4-9)所示。因此分别配置三种设备在不同容量下的经济成本见图 4-12。整体来看 SVC 的总成本最低，STATCOM 的总成本最高。

$$C_{SC} = 0.00241 s_C^2 - 2.44934 s_C + 1022.6066 \quad (4-7)$$

$$C_{SVC} = 0.002 s_V^2 - 2.04112 s_V + 852.1722 \quad (4-8)$$

$$C_{STATCOM} = 0.00378 s_T^2 - 3.84426 s_T + 1604.988 \quad (4-9)$$

式中 C_{SC} 、 C_{SVC} 、 $C_{STATCOM}$ ——SC、SVC、STATCOM 的单位容量经济成本；

s_C 、 s_V 、 s_T ——SC、SVC、STATCOM 的总运行容量。

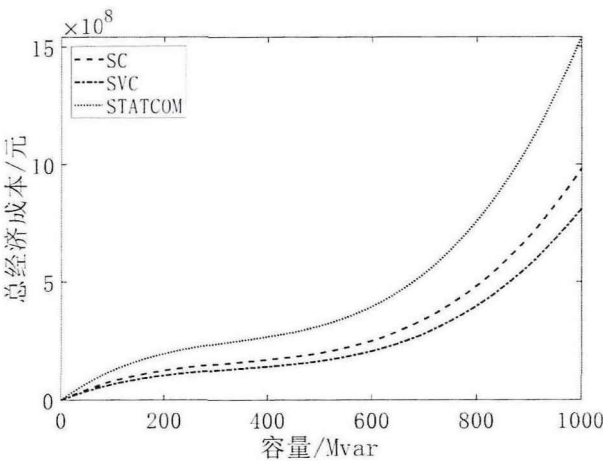


图 4-12 SC、SVC、STATCOM 的经济成本曲线

4.4.2 设备容量与抑制效果的关系

基于前文两机模型，分别在送端换流母线并联三种动态无功补偿装置，如图 4-13 所示。首先比较三种设备同容量情况下的作用效果，容量均取为

600Mvar，参数配置参照文献[57-59]。

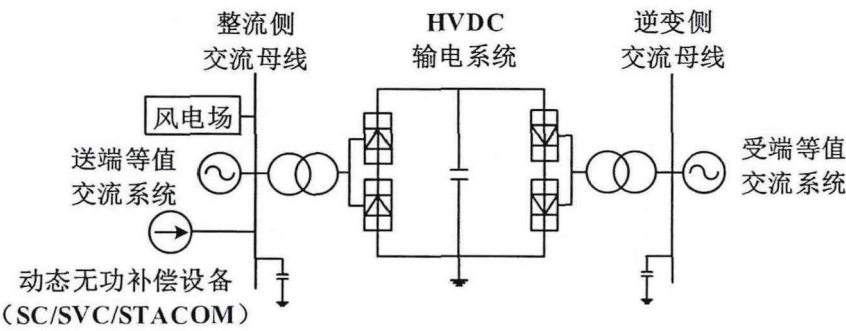


图 4-13 装设不同无功补偿设备的两机系统

以换相失败为例，装设同容量不同补偿设备的送端换流母线电压如图 4-14 所示。不同补偿设备的无功响应如图 4-15 所示。

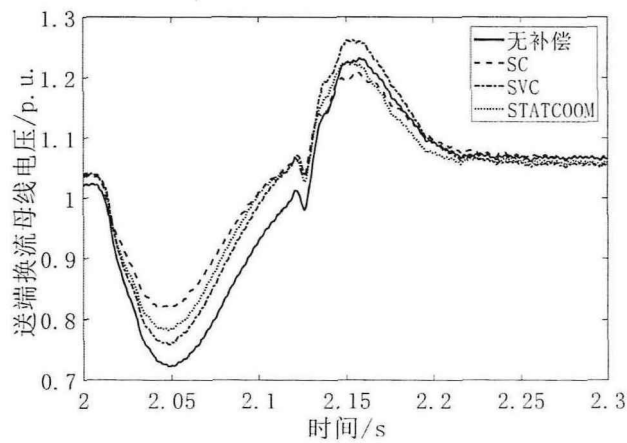


图 4-14 装设同容量不同补偿设备时故障后的送端换流母线电压

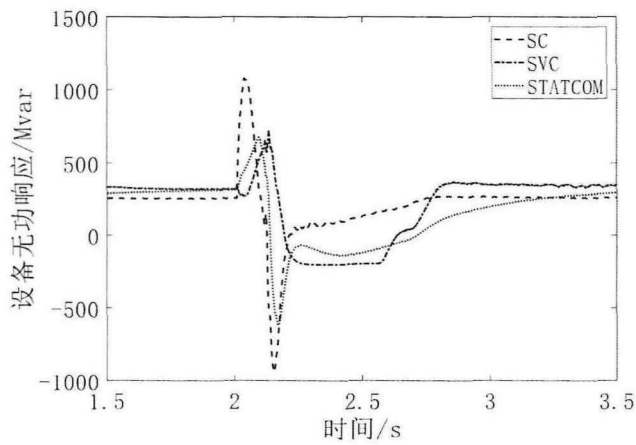


图 4-15 故障后同容量不同补偿设备的无功响应

表 4-2 列出了装设同容量不同补偿设备的 TOV 峰值与 TSI 指标。由表 4-2 可知，分别装设三种设备对故障后的暂态过电压都会产生影响，但是影响的程度和效果有些区别。装设同容量 SC、SVC 及 STATCOM 后，TOV 峰值变化幅

度分别为-1.9632%、2.3769%和-0.5354%，TSI 分别为 0.3405、-0.2541、0.3185，因此在此模型中 SC 抑制效果最佳，SVC 效果最差。

表 4-2 装设同容量不同补偿设备的仿真结果

无功配置情况	TOV 峰值(p.u.)	TOV 峰值变化(%)	TSI($\times 10^{-2}$)
不加无功补偿	1.2327	0.0000	0.0000
SC	1.2085	-1.9632	34.0480
SVC	1.2620	2.3769	-25.4061
STATCOM	1.2261	-0.5354	31.8495

由图 4-14 与图 4-15，SC 动作时间最早，响应迅速无延时，能快速抑制暂态过电压，TOV 峰值下降到 1.2085p.u.，且在故障结束后可以降为正常运行电压；STATCOM 也能随电压的变化而较快响应，但反应速度和抑制效果仍比不上 SC，TOV 峰值为 1.2261p.u.，抑制效果适中；SVC 无功响应正如前述对响应速度的分析，存在严重迟滞，过电压期间仍在发出无功，导致过电压反调，没有起到应有的抑制作用，TOV 峰值甚至反增到 1.2620p.u.，比无补偿情况下还要高。该结果与前述理论分析一致。

接着依次对各设备配置不同容量进行仿真，探究设备容量与抑制效果的关系。记录 TOV 峰值数据，并为对比暂态过电压的抑制效果分别计算 TSI 指标，其结果为表 4-3 所示。将数据结果导入 MATLAB 拟合后的峰值曲线与抑制效果曲线如图 4-16 所示。

表 4-3 SC、SVC、STATCOM 配置不同容量时的仿真结果

容量	SC		SVC		STATCOM	
	TOV 幅 值(p.u.)	TSI ($\times 10^{-2}$)	TOV 幅 值(p.u.)	TSI ($\times 10^{-2}$)	TOV 幅 值(p.u.)	TSI ($\times 10^{-2}$)
100Mvar	1.2300	18.1820	1.2313	12.7884	1.2326	7.4300
200Mvar	1.2260	26.8393	1.2378	3.4694	1.2323	12.0849
300Mvar	1.2214	28.5226	1.2458	-5.6705	1.2319	17.4471
400Mvar	1.2171	30.5293	1.2517	-11.6209	1.2309	22.8305
500Mvar	1.2129	32.2949	1.2585	-19.7866	1.2281	27.5623
600Mvar	1.2085	34.0480	1.2620	-25.4061	1.2261	31.8495
700Mvar	1.2039	36.0485	1.2676	-33.0937	1.2231	35.6181
800Mvar	1.1996	38.1063	1.2716	-38.0901	1.2199	38.8818
900Mvar	1.1957	40.1462	1.2754	-41.5897	1.2164	42.4364

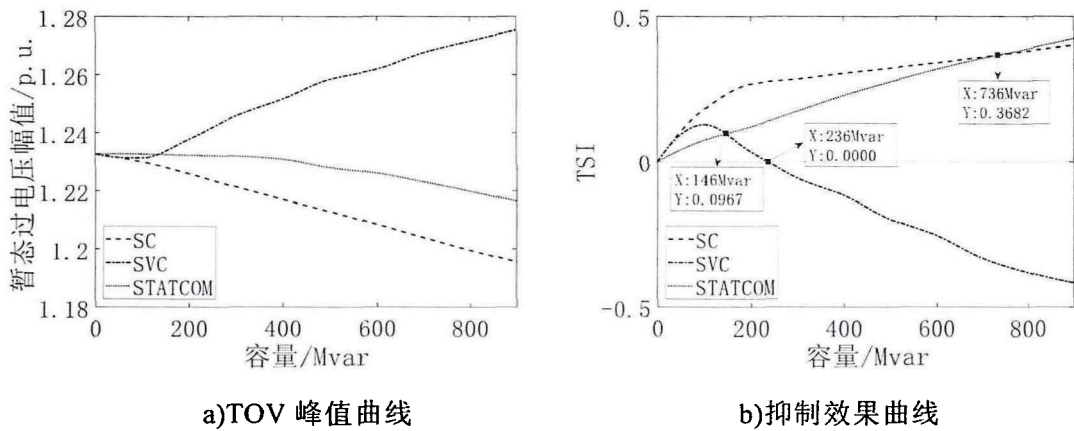


图 4-16 SC、SVC、STATCOM 配置不同容量时的仿真结果

由表 4-3 与图 4-16, 随着设备容量增加, SC 与 STATCOM 两种设备对应的 TSI 值都不断增大, 电压峰值整体呈下降趋势, 说明暂态过电压均逐步得到改善, 抑制效果普遍增强。二者的抑制效果分界点为 736Mvar, 容量比其更小时 SC 抑制效果更优, 容量更大时 STATCOM 更优。而 SVC 的抑制效果随容量增加先增后降, 仅在容量低于分界点 236Mvar 时 TSI 大于 0, 存在抑制作用, 电压峰值降低; 当容量超过分界点后, 则由于响应延时太久而出现反调作用助增了电压。另外, 在容量低于 146Mvar 的界限时, SC 出现了比 STATCOM 更好的抑制效果。

因此对比每一容量下的三种设备, 可见两机模型对应的分界点分别为 146Mvar 与 736Mvar。低于 146Mvar 时, SC 的 TSI 最高, 抑制效果最好, SVC 次之, STATCOM 最差; 在两分界点之间时, 仍是 SC 效果最好, 但 STATCOM 次之, SVC 最差; 高于 736Mvar 时, STATCOM 成为了最佳补偿设备, SC 次之, SVC 最差。

基于本章 4.4 节对两方面的讨论, 在兼顾经济成本和抑制效果的基础上, 当设备容量较大时 SC 的综合性能更优, 因为其抑制效果普遍较好, 经济成本适中; 而 STATCOM 虽然随容量进一步升高对过电压的改善也能不断提升, 但过高的容量不符合当前工程的实际应用, 且经济成本过度攀升, 性价比降低; 相对而言容量较大时 SVC 虽然价格便宜, 但抑制效果太差甚至反过来助增了过电压。当设备容量较小时 SVC 的整体性能更优, 因为此时三种设备抑制效果差不多, 而 SVC 经济成本偏低。但容量较小时, 不管哪种设备的抑制效果都较差, 系统仍存在暂态过电压风险^[60, 61]。因此基于理论分析并兼顾两方面的配置目标, 大部分情况下 SC 更为实用。

4.5 本章小结

动态无功补偿设备可随电压波动自动响应并进行补偿,维持系统无功平衡,进一步稳定暂态电压。本章首先对无功补偿技术的分类、发展等整体情况进行了归纳概述,并对于 SC、SVC 和 STATCOM 这三种常用动态无功补偿设备,从物理结构图、电压电流特性曲线及无功响应计算等多方面探究其抑制过电压的作用机理,建立了相应控制器的数学模型。并就设备暂态无功响应能力、经济成本、响应速度和谐波水平等关键性能的优劣进行了比较。接着给出三种设备单位容量经济成本与容量的函数关系式,绘制经济成本曲线;并基于两机模型,对比各设备不同容量时的暂态过电压抑制能力强弱,不仅验证了前述理论,还综合这两方面研究得到了单优化目标前提下的设备选择依据,可对不同场景所需设备进行初步选择。

但依靠单一指标的配置结果仍较为片面,且缺乏可控变量的调整准则。另外,对于两机系统的分析主要用于理论规律推导,但具体到比如设备抑制效果分界点时,则不能直接套用于其他系统。再者对于分界点的计算也只是大致结果,要得到精确结果需遍历所有情况再进行选择,对于复杂实际系统这几乎是不可能做到的。因此第五章引入智能优化算法搭建多目标优化模型,兼顾两类优化目标计算最优解,同时进行设备的类型选择和容量配置,提升了配置方法的全面性、精确性与通用性。

第5章 大规模风电直流送出系统暂态过电压抑制策略

5.1 暂态过电压抑制策略

控制参数优化后一定程度上改善了暂态过电压情况，但考虑到系统稳态运行和各环节动态性能的约束，参数调节范围有限，抑制效果也有限，仅通过参数配置故障后电压难以符合规程要求；而动态无功补偿装置对于大部分故障后的过电压具有较强抑制能力，但在严重故障后的抑制效果有限^[13]，且装设设备必然带来经济成本升高的问题。因此本文综合考虑两种抑制措施的优劣后，提出一种兼顾控制参数与动态无功补偿优化配置且基于改进帝国竞争算法联合时域仿真的暂态过电压抑制策略，并利用电磁仿真软件验证其有效性。

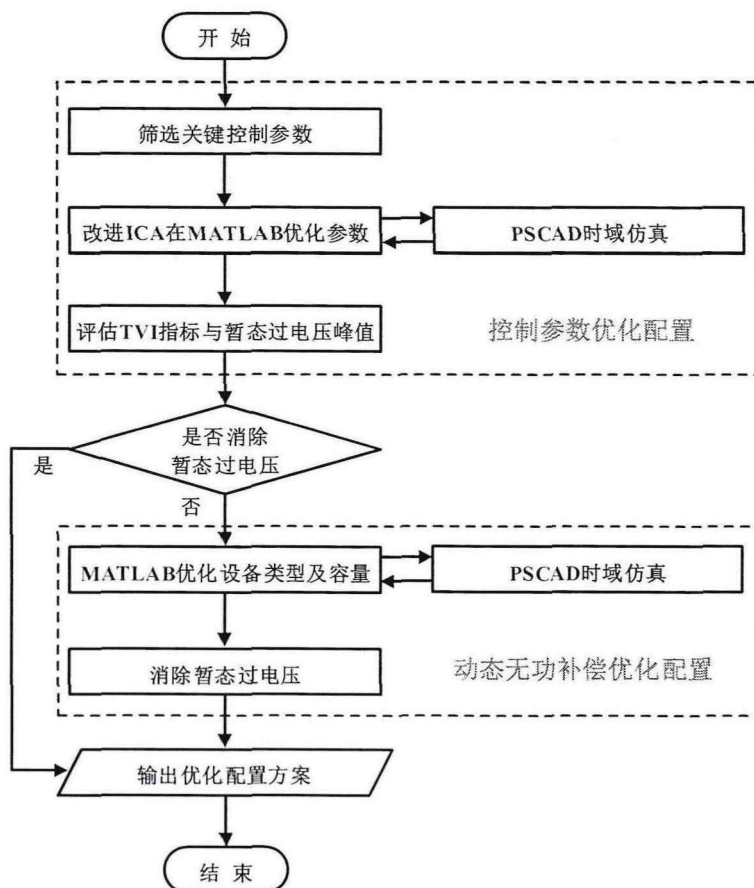


图 5-1 暂态过电压抑制策略

完整策略流程图如图 5-1 所示。第一步是控制参数配置，首先以量化指标筛选直流和风机控制环节的关键参数，将交直流电网中的众多控制参数精简为关键控制参数的配置问题；接着利用改进帝国竞争算法(ICA)联合时域仿真进行

考虑抑制效果的寻优求解，得到一组符合约束条件的最优参数配置方案；最后根据 TVI 指标与过电压峰值评估优化后的暂态电压是否处于稳定界限内。若已符合要求则中止计算且输出优化结果，若不符合则进行下一步。第二步是动态无功补偿配置，利用优化算法与时域仿真联合求解，对补偿设备类型及容量进行兼顾经济成本与过电压抑制效果的多目标优化求解，彻底消除暂态过电压，输出最终的优化配置方案。

5.2 优化模型建立

5.2.1 控制参数的优化模型

(1) 目标函数

关键控制参数的筛选已在第 3 章详细说明，继续使用暂态过电压抑制指数 (TSI) 作为评判指标，衡量参数优化后暂态过电压的改善情况。同时为获得更佳的抑制效果，将 TVI 的电压界限 $V_u(t)$ 下移至电压的稳态值来构造指标 TSI_n ，以其对应的 TSI_n 最大为优化目标，以待优化关键参数为变量，建立了如式(5-1)所示的目标函数，其中 $f_1=TSI_n$ ； X_k 为待优化变量，包括 I_{dl} 、 U_{dh} 、 U_{dl} 、 k_{p1} 及 k_{p1} 等参数。

$$F_k(X_k) = \max[f_1(X_k)] \quad (5-1)$$

(2) 约束方程

控制参数优化时，除了受到功率平衡等电力系统性能约束，以维持系统的正常稳定运行^[62, 63]，还会受关键控制参数上下限值的边界约束，给予搜索空间以一定限制^[64]。

1) 系统的有功无功平衡约束

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (5-2)$$

式中 P_{Gi} —— 发电机节点 i 有功出力；
 Q_{Gi} —— 发电机节点 i 无功出力；
 P_{di} —— 负荷节点 i 有功负荷；
 Q_{di} —— 负荷节点 i 无功负荷；
 G_{ij} —— 支路 i 与 j 间电导；

B_{ij} ——支路 i 与 j 间电纳;

θ_{ij} ——支路 i 与 j 间相角差;

U_i ——节点 i 电压。

2) 系统的状态变量约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, & i=1,2,\dots,N_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, & i=1,2,\dots,N_G \\ U_{Gi}^{\min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi}^{\max}, & i=1,2,\dots,N_G \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, & i=1,2,\dots,N_B \\ K_i^{\min} \leq K_i \leq K_i^{\max}, & i=1,2,\dots,N_K \end{cases} \quad (5-3)$$

式中 U_{Gi} ——发电机机端电压峰值;

K_i ——有载调压变压器分接头档位;

N_G ——发电机节点数;

N_B ——负荷节点数;

N_K ——有载调压变压器节点数。

3) 系统的控制变量约束

其中 U_{dh} 、 I_{dl} 、 k_{p2} 、 k_{i2} 、 k_{p4} 、 k_{i4} 为关键控制参数。

$$\begin{cases} U_{dh}^{\min} \leq U_{dh} \leq U_{dh}^{\max} \\ I_{dl}^{\min} \leq I_{dl} \leq I_{dl}^{\max} \\ k_{p2}^{\min} \leq k_{p2} \leq k_{p2}^{\max} \\ k_{i2}^{\min} \leq k_{i2} \leq k_{i2}^{\max} \\ k_{p4}^{\min} \leq k_{p4} \leq k_{p4}^{\max} \\ k_{i4}^{\min} \leq k_{i4} \leq k_{i4}^{\max} \end{cases} \quad (5-4)$$

约束条件还包括电力系统网络方程、发电机平衡方程、静态负荷平衡方程; 电力系统动态过程、发电机动态过程、直流风机控制动态过程等。上述等式约束、不等式约束及变量的搜索上下限值确定了解的可行范围。

5.2.2 动态无功补偿的多目标优化模型

(1) 多目标优化函数

由第 4 章所得结论, 补偿设备容量配置越大, 对系统动态电压支撑能力也就越强, 但成本费用也大大增加。考虑配置方案的实际应用意义, 就要求最大

化抑制效果的同时获得最优经济性，因此建立了兼顾经济成本与过电压抑制效果的多目标动态无功补偿优化模型。

单目标优化结果一般是全局最优解。而多目标优化，各目标间相互制约，对应性能的优化存在此消彼长的矛盾，优化某一性能将以其他性能作为代价，不存在让所有目标同时最优的一组解，只能互相协调获取折衷结果，式(5-5)为其目标函数形式。其中 $\min F(X)$ 为对目标函数 $F(X)$ 中 q 个子目标函数同等的极小化，子目标函数不会同时取到最小值； X 为控制变量构成的向量。

$$\min F(X) = \min[f_1(X), f_2(X), \dots, f_q(X)] \quad (5-5)$$

继续以 TSI_n 作为过电压抑制效果的优化目标，提出子目标函数 f_{1D} ，如式(5-6)所示。并结合第4章的分析，提出反应经济成本的子目标函数 f_2 如式(5-7)所示。

$$f_{1D} = \frac{\text{TVI}_n(Q_0) - \text{TVI}_n(Q_0 + \Delta Q_D)}{\text{TVI}_n(Q_0)} \quad (5-6)$$

$$f_2 = J(C_D, s_D, \delta_D) \quad (5-7)$$

式中 Q_0 —— 初始盈余无功；

ΔQ_D —— 动态无功补偿优化后的无功变化量；

δ_D —— 设备装设与否， $\delta_D=0$ 或 1 ；

J —— 设备总成本。

因此以 TSI_n 最大和成本最低为优化目标，建立动态无功补偿的多目标优化函数如式(5-8)所示，其中 X_D 为待优化变量，包括 s_D 、 δ_D 等参数。

$$F_D(X_D) = \max[f_{1D}(X_D), \frac{1}{f_2(X_D)}] \quad (5-8)$$

(2) 约束方程

对动态无功补偿设备的优化，不仅受到与“控制参数的优化模型”中相同的系统约束，还受到设备容量与设备类型的约束。设备容量因实际应用的限制而具有最大限值，设备类型也存在不同选择。因此约束方程比控制参数优化模型增加了设备容量 s_D 和设备类型选择参数 δ_D ，如式(5-9)所示。

$$\begin{cases} s_D^{\min} \leq s_D \leq s_D^{\max} \\ \delta_D \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (5-9)$$

式中 $s_D^{\min}$ —— 节点安装无功补偿容量的最小限值；

$s_D^{\max}$ —— 节点安装无功补偿容量的最大限值。

约束条件还包括接入补偿设备后的电力系统网络方程、补偿设备动态过程

等。

5.2.3 多目标优化问题的处理

多目标优化的传统处理方法有间接求解法和直接求解法。多数选择间接求解法，把多个目标函数转化为一个单目标函数，然后借助数学规划工具求解，包括线性加权法、约束法、目标规划法等。最常用的方法是用不同权重联合所有目标函数，再加入罚函数解除所有约束后继续求解。但这类方法的权重设定主观性太强，对目标函数要求也较高，比如要求连续乃至线性，一定程度限制了传统方法的应用。本文选择则结合 f_{1D} 和 f_2 来改造多目标函数，提出兼顾提升过电压抑制效果和降低成本的优化目标函数 f_3 ，将多目标问题转化为单目标，如式(5-10)所示。

$$f_3 = \text{TSI}_g = \frac{\text{TSI}_n}{s_D C_D \delta_D} = \frac{\text{TVI}_n(Q_0) - \text{TVI}_n(Q_0 + \Delta Q_D)}{(s_C C_{SC} \delta_C + s_V C_{SVC} \delta_V + s_T C_{STATCOM} \delta_T) \cdot \text{TVI}_n(Q_0)} \quad (5-10)$$

其中 δ_C 、 δ_V 和 δ_T 分别表示配置 SC、SVC 和 STATCOM 与否，取值均为 0 或 1 且同时有且仅有一个 1。因此将式(5-8)转化为式(5-11)得到最终的无功补偿目标函数，其余等式约束和不等式约束不变。

$$F_D(X_D) = \max[f_3(X_D)] \quad (5-11)$$

由式(5-11)，设备容量越大则抑制效果提升，但成本越高，多目标之间存在冲突。若成本增加程度比抑制效果上升程度高，则 f_3 减小，越来越偏离最优解；反之 f_3 增大，越来越靠近最优解。所以此函数的建立较好解决了多目标优化问题，同时降低了问题复杂度。

另外本文模型中涉及的诸多控制变量，其物理含义和单位量纲不尽相同，并且数值大小差距较大，在算法的实践中易因步长选取不合理导致收敛变慢甚至无法收敛的问题，因此不适合简单地套用模型或算法^[65]。为消除这些限制，本文对此做出一定优化，利用式(5-12)实现了控制变量取值的归一化，将取值范围统一在 0 与 1 之间，提升了计算结果的稳定性和可靠性。

$$z^* = \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \quad (5-12)$$

式中 z^* —— 归一化后数值；
 z —— 归一化前实际值；
 $z_{\max}$ —— 控制变量最大值；
 $z_{\min}$ —— 控制变量最小值。

5.3 基于改进帝国竞争算法的优化求解

基于已建立的优化模型,控制变量包括关键参数、补偿设备容量及其类型,目前主要依靠工程经验与行业规定获得控制变量 X_k 与 X_D 的取值,或依靠定性分析给出大致调整方向,缺乏调整标准。若通过传统试错法逐一调整后达到抑制目标的难度太大,且不具有对所有情境与所有扰动的普适性。另外过度调整控制变量 X_k 还会影响系统的稳定运行特性,甚至导致系统崩溃。因此控制变量的调整需兼顾诸多因素,本文采用智能优化算法来进行求解,并设置系统的稳态运行约束来降低对系统动态性能的影响,且该方法对不同场景的不同故障均具有一定适用性。

智能优化算法又称现代启发式算法,能按照某种机制以一定概率在整个求解空间探索最优结果,理论上可以在一定时间内找到最优解或近似最优解。常用的智能优化算法大多受自然环境中生物行为启发而产生,比如基于达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、模拟鸟群觅食行为的基于群体协作的粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题间相似性的模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)等。但这些优化方法普遍存在着不同指标权重难以协调、参数设置主观性大、易陷入局部最优等问题,往往只能得到次优解而不是最优解。

帝国竞争优化算法(Imperialistic Competitive Algorithm, ICA)是受人类社会启发的随机优化搜索的新型算法,灵感来自于真实世界中帝国主义竞争、殖民扩张和人类社会政治进化的历史过程。该算法一经提出,便有很多学者对其进行了积极的研究和探索,目前 ICA 已能应用于多种优化问题中,比如求解最优潮流、风电优化调度、变电站选址定容等。ICA 不需要梯度函数参与,具有不依赖于初始解、全局收敛性较强的优点,能同时得到多个全局最优解,在优化效果方面也显示了其优越性。

5.3.1 帝国竞争优化算法

标准 ICA 算法优化流程如图 5-2 所示。首先随机产生个体规模为 N_p 的初始种群,群体中的每个个体都看作一个国家,在初始化后所有国家被划分为帝国主义国家和殖民地国家两种。选择最强大的几个定义为帝国主义国家,剩余的会被划分为殖民地,分配给各帝国主义国家,组成多个帝国。随后在迭代与优化过程中,各殖民地根据同化系数 β 和同化偏移角 γ 向其隶属的帝国主义国家

移动。此时通过竞争机制，强势帝国主义国家吞并弱势帝国主义国家的最弱殖民地，来获得更多的殖民地，以此强化种群对关键区域的收敛效率。殖民地逐渐集中于强大帝国，失去所有殖民地的帝国主义国家会消亡。如此操作就能使群体收敛到代价函数的全局最优值，当所有的殖民地都被同一个帝国主义国家占领时算法结束运行，输出种群中的最优个体。ICA 可对范围内的所有个体进行有效优化，下面详细说明几个关键环节。

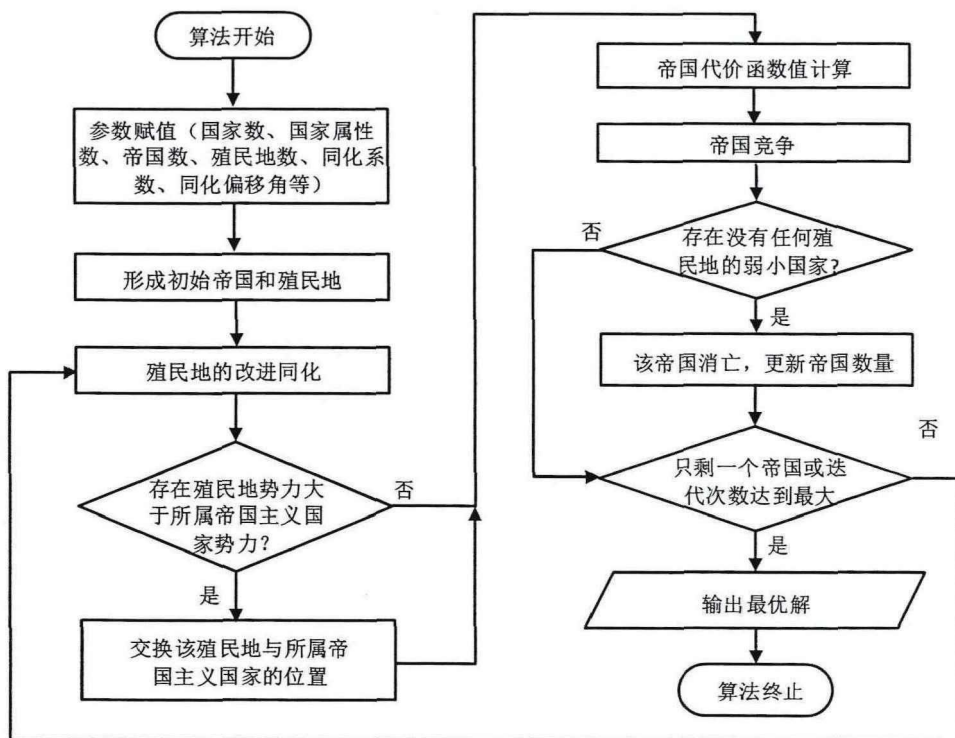


图 5-2 帝国竞争算法

(1) 形成初始帝国和殖民地

帝国竞争算法中的个体为国家，首先在搜索空间内随机产生 N_p 个国家，对于具有 N 个决策变量的优化问题，每个国家都是 $1 \times N$ 维向量，即表示为 $\text{country} = [v_1, v_2, \dots, v_N]$ ，其中 v_i 为被优化的变量，在 ICA 算法中对应于国家的社会政治属性等。同时以代价函数 $f(\text{country}) = f(v_1, v_2, \dots, v_N)$ 来评估国家势力，二者成反比关系。

接着对势力按强弱排序后，靠前 N_i 个国家将视为帝国主义国家，将其余的 N_c 个归类为殖民地， N_c 也是初始殖民地数量，则存在数学关系 $N_p = N_i + N_c$ 。帝国主义国家将随机获得殖民地，势力越强则获得越多，如此就组成了 N_i 个初始帝国。式(5-13)为 ICA 算法中第 i 个帝国主义国家的标准化代价值函数值 C_i ，其中 c_i 为第 i 个帝国主义国家的代价函数值。第 i 个帝国主义国家拥有的初始殖民

地国家个数 NC_i 和殖民地国家的分配方式依据式(5-14)计算, 其中帝国主义国家的标准化势力 p_i 如式(5-15)。后文用 c_i 表示各国代价函数值, 由代价函数计算得来。

$$C_i = c_i - \max_{0 < j < N_i} \{c_{1j}\} \quad (5-13)$$

$$NC_i = \text{round}\{p_i N_c\} \quad (5-14)$$

$$p_i = \left| C_i / \left(\sum_{j=1}^{N_i} C_j \right) \right| \quad (5-15)$$

(2) 殖民地同化

现实社会中在帝国形成后, 必然伴随着殖民地的经济、文化等属性趋向于所属帝国主义国家, 这一过程就叫作同化。帝国主义国家为了能更好控制其殖民地, 实现个体进一步壮大, 通常会将自己的思想模式及文化风俗推广到殖民地, 吸收其他殖民地使其成为自身的一部分, 这一步骤的目的是进行帝国的内部更新。体现在 ICA 算法中, 帝国主义国家通过让殖民地 from 原有位置向它移动来改善殖民地质量, 提高其对殖民地的影响。

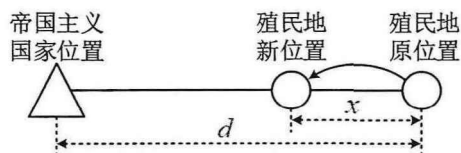


图 5-3 殖民地向所属帝国主义国家移动

如图 5-3 所示, 殖民地国家会沿着其与帝国主义国家所在位置的连线随机运动到新位置, 与原位置的距离为 x , x 的定义满足均匀分布, 如式(5-16)所示。图中 d 为殖民地原位置与所属帝国主义国家的距离。

$$x \sim U(0, \beta d) \quad (5-16)$$

式中 β —— 同化系数, $\beta > 1$ 。

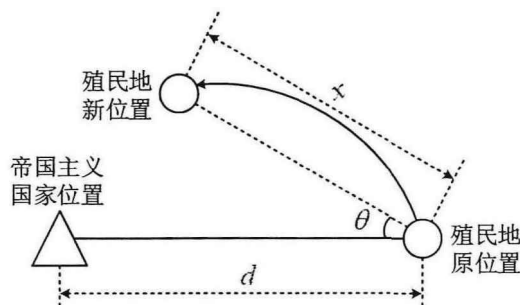


图 5-4 考虑偏移方向角度后殖民地向所属帝国主义国家移动

同时为扩大搜索范围, 在运动方向上考虑了随机变量的偏差, 增加了偏移方向角度 θ , 如图 5-4 所示。 θ 定义满足均匀分布如式(5-17)所示。在 β 取值 2,

γ 取值 $\pi/4$ 时, 可使帝国很好地收敛到全局最优值。殖民地在其所属空间移动的结果可能使其势力超过所属帝国主义国家, 则此时二者互换位置来实现局部收敛。

$$\theta \sim U(-\gamma, \gamma) \quad (5-17)$$

式中 γ —— 同化偏移角, $0 < \gamma < \pi$ 。

(3) 帝国代价值计算

帝国主义国家的代价值在同化步骤后会产生变化, 帝国的整体势力由包含的所有国家势力组成, 其总代价值 TC_i 如式(5-18)所示。 ξ 为殖民地国家对帝国总势力的影响程度, 赋值小时帝国总势力由帝国主义国家决定, 取值在 0 到 1 之间且多数情况取 0.1。

$$TC_i = c_{1i} + \xi \frac{\sum_{j=1}^{NC_i} c_{2j}}{NC_i} \quad (5-18)$$

式中 c_{2j} —— 第 j 个殖民地的代价函数值。

(4) 帝国竞争

强大帝国主义国家会争夺并控制弱小殖民地。如图 5-5 所示, 经过代价值计算后, 最弱小帝国的最弱殖民地将成为其他帝国的争夺目标, 帝国势力越强

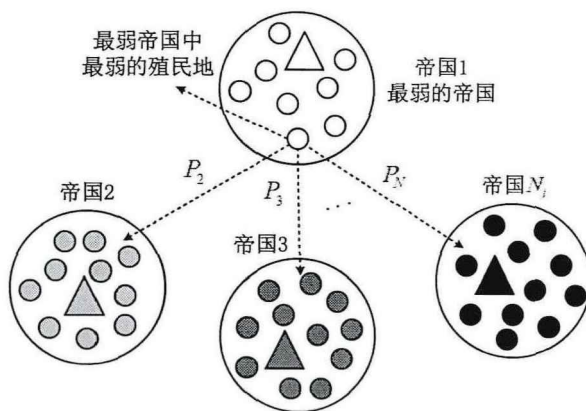


图 5-5 帝国间的竞争

非最强大帝国也可能成功夺取殖民地, 因此为使竞争机制更符合实际情况, 创造了随机概率来抉择争夺成功的帝国。各帝国得到殖民地的概率集如式(5-23)所示, 其中已剔除最弱帝国。式(5-19)至式(5-22)为推导过程。

$$NTC_i = TC_i - \max_{i=1}^n (TC_i) \quad (5-19)$$

$$P_i = \left| NTC_i / \left(\sum_{i=1}^{N_i} NTC_i \right) \right| \quad (5-20)$$

$$P=[P_1, P_2, \dots, P_{N_i}] \quad (5-21)$$

$$R=[r_1, r_2, \dots, r_{N_i}], \quad r_1, r_2, \dots, r_n \sim U(0,1) \quad (5-22)$$

$$S=PR=[s_1, s_2, \dots, s_{N_i}] \quad (5-23)$$

式中 NTC_i ——第 i 个帝国标准化后的总代价值；

P_i ——由 NTC_i 计算得到的第 i 个帝国获得殖民地国家的概率；

P —— P_i 组成的向量；

R ——与 P 维数相同的 0 至 1 内均匀分布的随机数向量；

S ——增加随机性后各帝国获得殖民地的概率向量；

最终 S 中最大概率对应的帝国会争夺成功。

(5) 帝国消亡

ICA 算法中规定，当某一帝国失去所有殖民地时则帝国消亡。经过前述步骤反复循环迭代，强大帝国会不断吞并殖民地并不断增强，而弱小帝国则逐渐消亡，最终剩下一个最强帝国获得了所有殖民地，实现了国家的统一，至此算法收敛寻到最优解，这个剩下的帝国主义国家就是搜寻到的全局最优解。

5.3.2 改进帝国竞争算法

为降低早熟收敛风险，避免算法后期群体多样性减少，并进一步改良求解精度与计算效率，本文结合社会情况的复杂性和多样性，考虑了初始参数设置合理性与殖民地同化机制移动方向取值的有效性，增加了殖民地自我更新改革机制与帝国主义国家联盟合并机制，进行了如下几点改进：

(1) 初始参数设置的改进

考虑到标准化帝国竞争算法采用式(5-14)计算每个帝国的殖民地个数 NC_i ，而完全根据公式计算可得最弱的帝国势力为 0，从而导致殖民地个数为 0。为了避免这种情况，防止殖民地个数为 0，将式(5-13)改造成如(5-24)所示。

$$C_i = \begin{cases} 1.3(\max_{1 \leq j \leq N_i} \{c_j\}) - c_i, & \max_{1 \leq j \leq N_i} \{c_j\} > 0 \\ 0.7(\max_{1 \leq j \leq N_i} \{c_j\}) - c_i, & \max_{1 \leq j \leq N_i} \{c_j\} \leq 0 \end{cases} \quad (5-24)$$

(2) 同化机制的改进

在标准算法的同化机制中，殖民地 toward 所属帝国主义国家靠近遵循的是随机取值的偏移方向角度 θ ，导致殖民地的位置变动完全无规律，运动方向是盲目的，导致收敛速度被抑制。因此按照式(5-25)来改进同化偏移角 γ ，进而规范 θ

的取值。其中下标 i 表示第 i 个殖民地；上标 k 与 $k+1$ 表示第 k 次与 $k+1$ 次迭代； γ 范围为 $\gamma_i^{k+1} \leq \pi/4$ ，若越界 γ_i^{k+1} 则取为 $\pi/4$ 。当某次位置变化后减小了殖民地代价值， γ 随之降低，反之 γ 增大。如此规范后能保证位置的高效变化，避免无效移动，最终加快算法收敛^[66]。

$$\gamma_i^{k+1} = \begin{cases} 0.8\gamma_i^k + 0.2rand\gamma_i^k, & c_i^k < c_i^{k-1} \\ \frac{\gamma_i^k}{0.5 + 0.5rand}, & c_i^k > c_i^{k-1} \end{cases} \quad (5-25)$$

(3) 增加殖民地改革机制

仅依靠同化机制，仍可能导致某帝国主义国家长期处于统治地位不被替代的现象^[67]，反应在算法中，该帝国主义国家所属帝国的各变量会逐渐变得相似，大大削弱了算法的寻优性能。此时考虑增加殖民地的内部改革操作^[68, 69]，使殖民地的政治、经济、文化等特征突然产生变化。改革可以增加标准算法中的群体多样性，在下次迭代进行同化时，就能较好避免无效搜索且增强算法的搜索能力与搜索广度，有效防止同化作用的过早收敛避免算法陷入局部最优，并防止算法后期种群多样性减少的情况，从而保证算法的有效性。殖民地改革操作在算法中体现为在同化机制后，还要依据改革概率移动部分殖民地的位置，若改革后殖民地势力增大则改革成功，否则改革失败且不更换原位置。

较强的殖民地经过改革机制有一定概率会丢失，如此反而降低了算法的求解精度和最优解的有效性。因此为了在丰富种群多样性的同时避免强势殖民地的丢失，可以考虑基于殖民地的交互以构造改革后的新位置，利用差分进化算法中的变异操作来进行算法改进。式(5-26)至式(5-28)为改革后殖民地位置 $country$ 的获取规则。式中缩放系数 F 为避免早熟收敛采用了自适应调整，且变异系数 F_0 取值 0.5；并以迭代数 k 及其最大设定值 k_m 构造了自适应系数 λ 。

$$country = country_0 + F(country_2 - country_1) \quad (5-26)$$

$$F = F_0 \cdot 2^\lambda \quad (5-27)$$

$$\lambda = e^{1 - \{k_m / (km+1-k)\}} \quad (5-28)$$

式中 $country_0$ ——改革前殖民地位置；

$country_1$ ——随机殖民地位置；

$country_2$ ——另一随机殖民地位置。

在殖民地改革机制中，不是所有殖民地都改革，而是以一定改革概率 r 进行自我更新。 r 表示整个帝国中所有殖民地发动改革的比例，常用取值 30%。

(4) 增加帝国主义国家合并机制

随着算法的不断迭代，部分帝国主义国家在搜索空间的位置可能会逐渐靠

近，此时则认为两个国家的统治情况类似，可以结成联盟。因此参数初始化时即需要设定距离阈值，当两个国家位置小于阈值时其所属帝国会合并，新帝国统治者即为合并前帝国主义国家中的较强者，并将占领合并前的所有殖民地。合并机制提升了算法的快速收敛能力与计算效率。

5.3.3 基于改进帝国竞争算法的控制参数及无功补偿优化配置

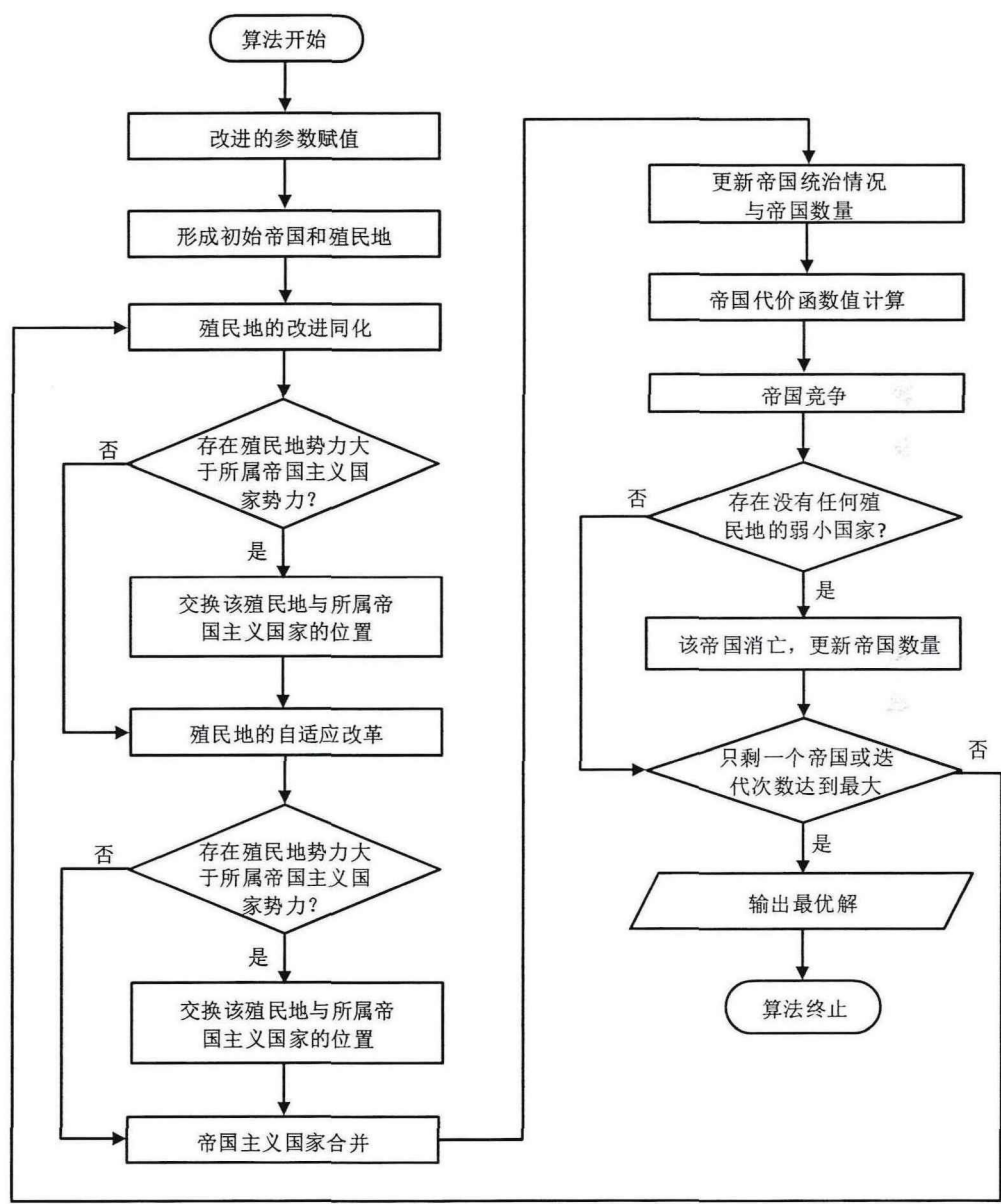


图 5-6 基于改进帝国竞争算法的优化流程图

为解决大规模风电直流送出系统送端的暂态过电压问题，本文以前述直流风机控制参数及三种动态无功补偿装置影响暂态过电压的机理为理论基础，基于扰动下暂态电压的动态变化过程，为充分发挥两种抑制措施对暂态过电压的

优化作用,提出一种基于改进帝国竞争算法联合时域仿真的优化方法,进行控制参数及动态无功补偿的优化配置。这两类控制变量的优化流程均如图 5-6 所示,具体步骤为:

(1)初始化帝国。各参数赋初值,对于控制参数优化配置,随机生成 N_p 个由筛选出的关键控制参数 I_{dl} 、 U_{dh} 、 U_{dl} 、 k_{p1} 及 k_{i1} 组成的多维向量,作为 N_p 个初始国家,向量形式表示为 $\text{country}=[I_{dl}、U_{dh}、U_{dl}、k_{p1}、k_{i1}]$ 。设置初始帝国主义国家数 N_i ,初始殖民地国家数 $N_c=N_p-N_i$ 、同化系数 β 、初始同化偏移角 γ 、最大迭代次数 k_m 、变异算子 F_0 、改革概率 r 、殖民地国家对整个帝国势力的影响程度 ξ 。接着利用代价函数 $f(\text{country})=2-f_1(X_k)$ 计算各个国家初始代价函数值 c_i ,利用改进后的式(5-24)与式(5-15)计算各帝国主义国家的初始标准化势力 p_i ,得到各帝国主义国家的初始殖民地数量 NC_i ,形成 N_i 个帝国,并根据前述分析设置等式与不等式约束条件。而对于无功补偿优化配置,则修改为 $\text{country}=[Q_F、\delta_D]$ 与 $f(\text{country})=-f_3(X_D)$,其余设置与控制参数优化配置一致。

(2)殖民地的改进同化。按改进后的同化机制式(5-25)得到此次迭代使用的 γ ,再按式(5-16)、式(5-17)得到移动距离 x 和偏移方向角度 θ ,使殖民地的位置不断靠近所属帝国主义国家,到达新位置。基于此时二者的代价函数值大小,判断是否需要交换地位,更新该帝国的统治情况。

(3)殖民地的自适应改革。按增加的改革机制式(5-26),根据改革概率 r 来随机选择一部分殖民地,重新生成新位置来替换殖民地原有位置。基于此时殖民地国家与所属帝国主义国家代价函数值大小,判断二者是否交换地位,更新该帝国的统治情况。

(4)帝国合并。若两个帝国主义国家距离小于给定阈值,则两个帝国合并为一个帝国,势力更强的帝国主义国家将成为合并后新帝国的统治者,新帝国的殖民地是原有两个帝国殖民地之和。基于此时殖民地国家与所属帝国主义国家的,更新帝国数量与帝国统治情况。

(5)帝国总代价值计算。按式(5-18)计算帝国总代价值 TC_i 。

(6)帝国竞争。按式(5-23)计算各帝国占领殖民地的概率集 S , S 中概率最高的帝国会在竞争机制中脱颖而出,并成功控制最弱小帝国的最弱小殖民地。

(7)帝国消亡。若有帝国失去所有殖民地,则删除此帝国。更新帝国数量 N_i 、殖民地数量 N_c 等。最终最强大帝国实现统一后则算法收敛,输出最终结果。否则回到步骤(2),循环步骤(2)至(7)。直至剩下一个帝国,输出优化后的唯一帝国主义国家的位置信息,即为向量 country 的最优解,对应着控制参数配置或无

功补偿配置的最优参数。

5.3.4 优化算法与时域仿真的实时联合调用

MATLAB 编程软件具有优秀的矩阵运算和优化计算能力,对于数据的处理十分便捷,因此使用 MATLAB 实现改进帝国竞争算法的程序编写。然而每次迭代需要对待优化的电力系统进行电磁暂态仿真,并由各国位置信息计算得到各国代价函数值,这一过程 MATLAB 难以精确实现。这是因为电力系统故障后的暂态仿真计算比较复杂,交直流系统涉及大量微分、限幅、选择等强非线性环节,难以采用传统数学解析优化,尤其是含直流和风机控制模块的多机系统暂态仿真,此时就需要借助专业的电力系统电磁暂态时域仿真软件 PSCAD,弥补 MATLAB 的不足。

为充分发挥 PSCAD 和 MATLAB 各自的专业性能,必须解决两种软件的交互问题。PSCAD 官方开发了 PYTHON 库,可以利用 PYTHON 软件编写中接口脚本,实现修改 PSCAD 电网模型里指定模块变量、执行仿真命令等功能的控制。而 MATLAB 可以通过调用 WINDOWS 系统中 CMD 控制台的函数,来运行 PYTHON 脚本。由此 MATLAB 脚本可以调用对应 PYTHON 脚本,进而唤起 PSCAD,最后成功覆写 PSCAD 中指定变量值后执行模型仿真,完成了 MATLAB 优化结果的送出。而 PSCAD 仿真数据可通过 PSCAD 软件设置,自动保存在 WINDOWS 系统的文本文件中, MATLAB 即可从中读取指定序号的数据列,完成了 PSCAD 仿真结果的回传。

打通两个方向的数据传输通道后,最终实现了 PSCAD-PYTHON-MATLAB 的数据传递与交互迭代,完成了时域仿真与优化算法的实时联合调用。这种联合优化方法结合了 PSCAD 与 MATLAB 两者的优势,不仅有准确模拟电磁暂态过程的精确性,还兼顾了改进 ICA 算法的高效性,最终优化结果可以有效抑制直流送端系统暂态过电压。

联合优化的具体实现如图 5-7 所示。左侧为系统时域仿真部分, PSCAD 仿真模型中待调整变量所在的模块会接收 MATLAB 传递过来的包含控制参数配置结果或无功补偿配置结果的帝国位置信息;接着进行时域仿真计算,得到包含暂态过电压动态变化过程信息的数据结果;最后在仿真结束后,将数据结果保存在文本文件,最终传递至 MATLAB 用于对控制变量进行优化。

右侧为优化算法部分,主程序架构也在这部分。MATLAB 会在每次仿真结束时,接收由 PSCAD 返回的暂态过电压动态变化数据;接着计算对应代价函数值,在 MATLAB 中调用改进帝国竞争算法进行寻优求解,更新所有控制变量的配置结果;最后将优化后的控制变量值,通过 PYTHON 脚本唤起并覆写

PSCAD 仿真模型中相应模块的变量取值。

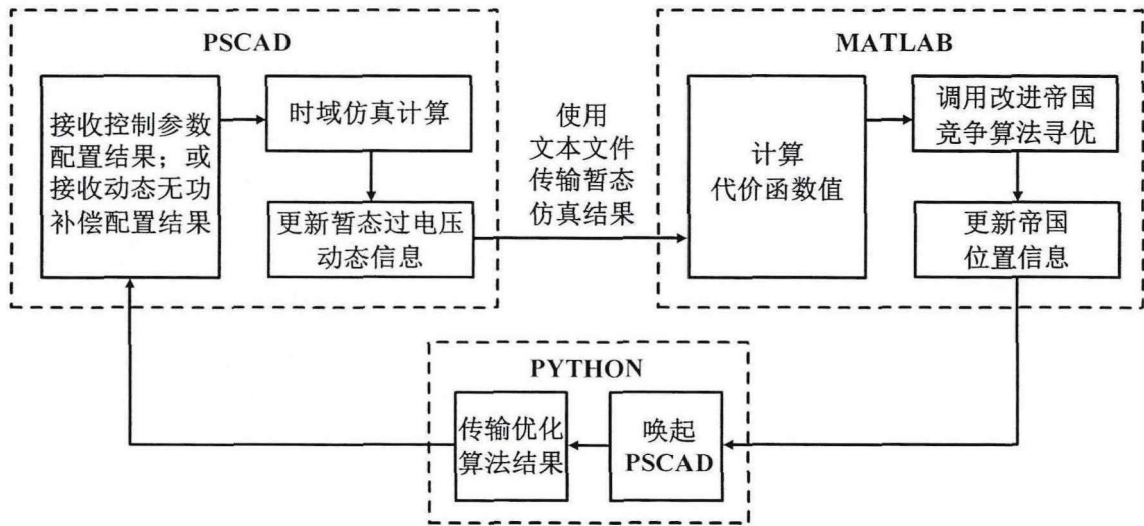


图 5-7 PSCAD-PYTHON-MATLAB 联合优化

5.4 仿真验证

以两机系统与修改后的 10 机 39 节点系统为算例，对图 5-1 所示的完整暂态过电压抑制策略进行仿真验证，仍在换相失败故障的情况下进行讨论。

5.4.1 两机系统

(1) 关键控制参数的优化配置

关键控制参数的筛选步骤已在第 3 章完成。接着搭建优化模型，随机生成 $N_p=200$ 个由关键控制参数 I_{dl} 、 U_{dh} 、 U_{dl} 、 k_{p1} 及 k_{i1} 构成的多维向量，设置初始帝国主义国家为 $N_i=8$ 个，则初始殖民地为 $N_c=N_p-N_i=192$ 个；同化机制中取同化系数 $\beta=2$ ，初始同化偏移角 $\gamma=\pi/4$ ；改革机制中取变异算子 $F_0=0.5$ 、算法改革概率 $r=0.3$ 、最大迭代次数 $k_m=100$ ；在总代价函数值计算中，殖民地对整个帝国势力的影响程度 $\xi=0.1$ 。

分别采用标准帝国竞争与改进帝国竞争对关键控制参数进行优化求解，其收敛曲线如图 5-8 所示。易见改进后帝国竞争较快收敛，在第 28 次迭代时就获得了最佳配置方案，计算效率大幅提升；标准帝国竞争收敛较慢，迭代次数已经超过了 50 次。

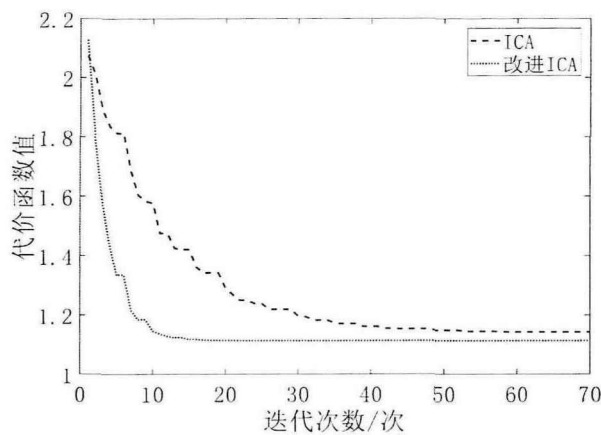


图 5-8 优化关键控制参数的收敛曲线

优化结果如图 5-9 与表 5-1 所示。

1)与参数初值相比，经过两种算法优化后的 U_{dh} 、 U_{dl} 、 k_{rl} 取值均减小， I_{dl} 、 k_{pl} 取值均增加，该趋势再次印证了第 3 章理论推导规律。

2)另外对比无优化故障后的情况，两种算法下的暂态过电压均得到了一定程度的抑制。过电压峰值从 1.2327p.u.分别降低为 1.1358p.u.与 1.1247p.u.，但均未能限制在 1.1p.u. 以下；暂态电压越限指标 TVI($\times 10^{-3}$)从 4.7605 分别降低为 0.4122 与 0.2288，也均大于 0。意味着此时仍超出了暂态电压稳定界限，未达到抑制要求，这是由于控制参数的抑制能力存在诸多局限性。因此说明方案有效，但还需要进行抑制策略的下一步骤。

3)另外，改进 ICA 比标准 ICA 的代价函数值由 1.1428 降低到 1.1138，TSI 由 0.9134 提高到 0.9519，抑制效果得到了显著提升，验证了算法改进的有效性。

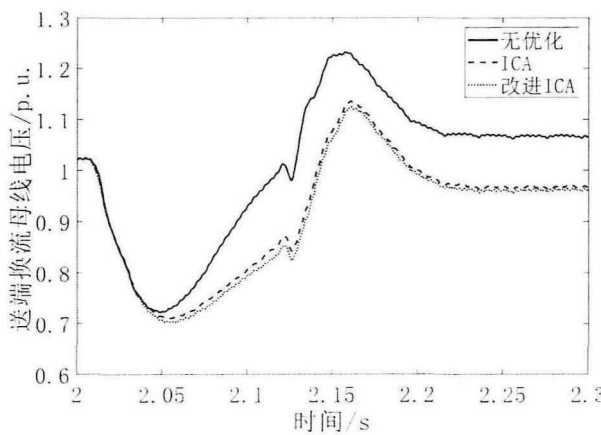


图 5-9 优化关键控制参数后的暂态过电压

表 5-1 关键控制参数的优化结果

结果类型	参数与指标	无优化	ICA	改进 ICA
参数配置结果	I_{dl}	0.55	0.809	0.841
	U_{dh}	0.90	0.660	0.652
	U_{dl}	0.40	0.375	0.358
	k_{pl}	2.00	2.244	2.421
	k_{il}	0.05	0.043	0.035
仿真结果	TOV 峰值(p.u.)	1.2327	1.1358	1.1247
	TVI($\times 10^{-3}$)	4.7605	0.4122	0.2288
	TSI($\times 10^{-2}$)	0.0000	91.3417	95.1938
	代价函数值	2.0000	1.1428	1.1138

(2) 动态无功补偿的优化配置

随机生成 $N_p=200$ 个由 Q_F 、 δ_D 构成的向量，其他初始设置与控制参数优化一致。在改进 ICA 优化控制参数结果的基础上继续进行仿真，各类指标也以此结果为电压基准进行计算。收敛曲线如图 5-10 所示，易见改进 ICA 收敛速度更快，优化效率显著提高。

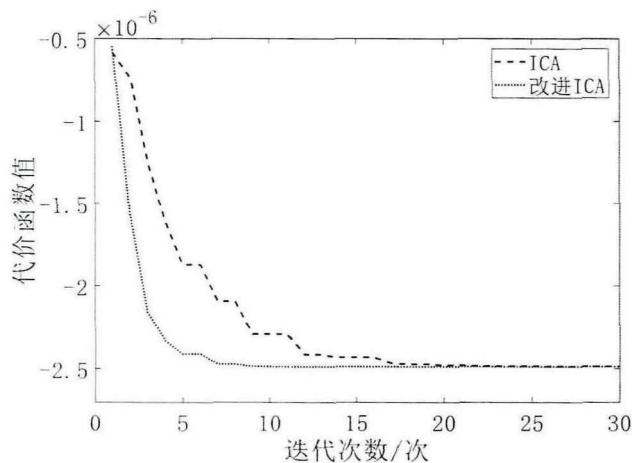


图 5-10 优化动态无功补偿的收敛曲线

优化结果如图 5-11 与表 5-2 所示。

1)标准 ICA 的配置方案为在直流送端接入 521MVar 的调相机，改进 ICA 的配置方案为接入 527MVar 的调相机，不管哪种算法，兼顾抑制效果与成本后的最优设备均为同步调相机，与第 4 章结论互为支撑。

2)对比基准曲线，两种算法下的暂态过电压均得到了很大程度的抑制。过电压峰值从 1.1247p.u.分别降低为 1.0834p.u.与 1.0821p.u.，均有效限制在 1.1p.u. 以下；暂态电压越限指标 TVI($\times 10^{-3}$)从 0.2288 降低为 0。完全消除了暂

态过电压，达到了预设目标，证明了抑制策略的有效性。

3)另外，改进 ICA 比标准 ICA 的代价函数值由-2.4852 降低到-2.4875，说明在经过改进 ICA 优化后对应的结果中，电压抑制效果提升程度更大，经济成本提升程度降低，获得了比标准 ICA 算法的更优解，验证了算法改进的有效性。

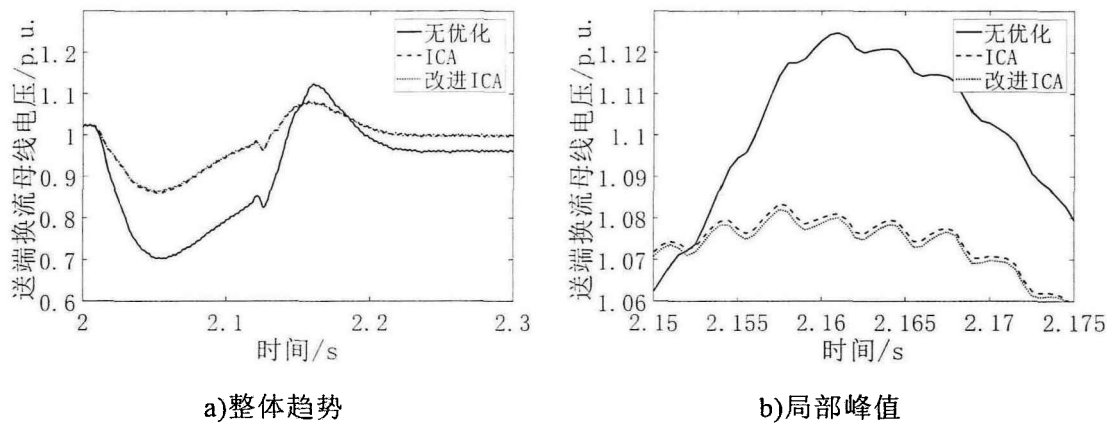


图 5-11 优化动态无功补偿后的暂态过电压

表 5-2 动态无功补偿的优化结果

结果类型	参数与指标	无优化	ICA	改进 ICA
补偿设备	设备类型	无	SC	SC
配置结果	设备容量(Mvar)	无	521	527
暂态过电压	TOV 峰值(p.u.)	1.1247	1.0834	1.0821
	TVI($\times 10^{-3}$)	0.2288	0.0000	0.0000
	TSI($\times 10^{-3}$)	0.0000	100.0000	100.0000
仿真结果	代价函数值($\times 10^{-6}$)	-	-2.4852	-2.4875

5.4.2 修改后的 10 机 39 节点系统

前述仿真结果表明所提抑制策略在两机系统的可行性,但该系统结构简单、等值较多，发电机较少，而实际工程往往复杂和详细得多。所以本文进一步选择了改造 10 机 39 节点模型，并对其进行优化，所得结果更有说服力。

10 机 39 节点系统是标准测试系统，原型是位于美国新英格兰的 345kV 电力系统。其中 39 节点连接等值机，表示与之相连的加拿大电网。本文设定系统频率为 50Hz，对原结构删减修改后改造为典型风机经直流送出系统。修改后的 10 机 39 节点系统如图 5-12 所示，双馈风机在原系统 37 节点集中接入，其他节点仍为传统发电机模型。在 2 节点与 25 节点间添加±800kV 直流输电系统，参数设置参考两机模型，因此抑制目标为送端母线 25 的暂态过电压。

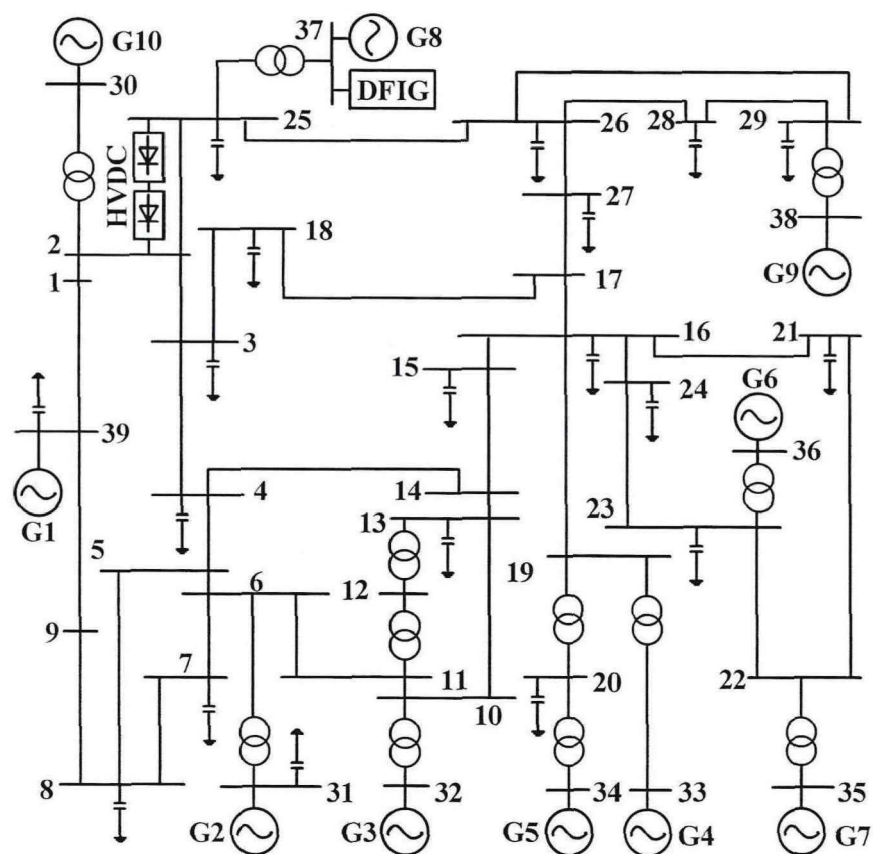


图 5-12 修改后的 10 机 39 节点系统

关键控制参数的优化结果如图 5-13 与表 5-3 所示。两种算法下的暂态过电压均被抑制，但评估 TOV 峰值与 TVI 指标后，均仍未达到 TOV 抑制要求，抑制策略有效但效果有限。另外改进 ICA 代价函数值更低，TSI 指标更高，抑制效果更好。

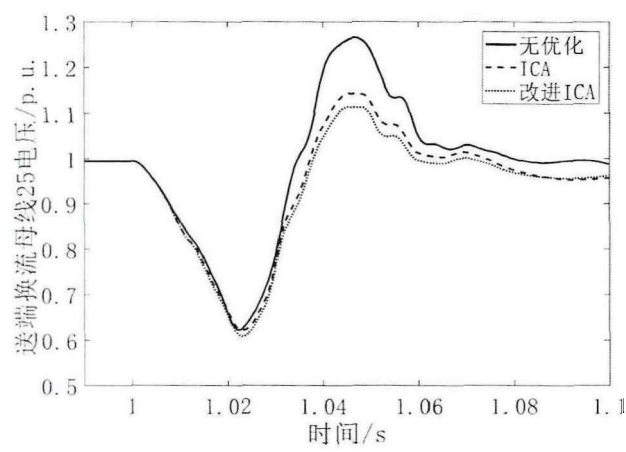


图 5-13 优化关键控制参数后的暂态过电压

表 5-3 关键控制参数的优化结果

优化算法	无	ICA	改进 ICA
TOV 峰值(p.u.)	1.2663	1.1447	1.1149
TVI($\times 10^{-3}$)	2.0386	0.3086	0.0725
TSI($\times 10^{-2}$)	0.0000	84.8610	96.4429
代价函数值	2.0000	1.4222	1.2891

动态无功补偿的优化结果如图 5-14 与表 5-4 所示。两种算法下的暂态过电压均得到了很大程度的抑制，同时过电压峰值均没有超过 1.1p.u.且 TVI 为 0，消除了暂态过电压。虽然就电压抑制效果而言标准 ICA 略优，但改进 ICA 代价函数值更低，获得了综合考虑成本后的最佳配置结果。

综合在 39 节点复杂系统中的应用情况,得到的结果表明所提抑制策略简单有效，且具有一定通用性与普适性。

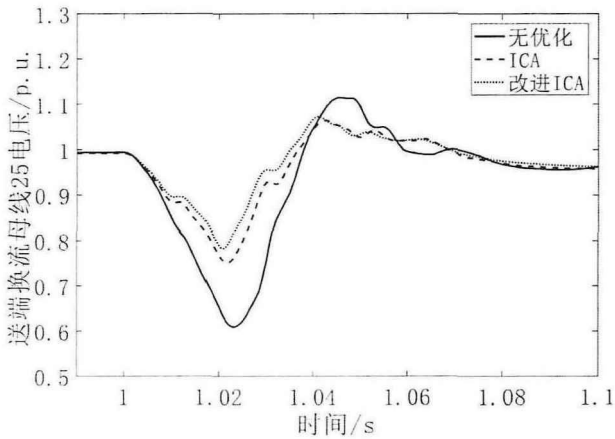


图 5-14 优化动态无功补偿后的暂态过电压

表 5-4 动态无功补偿的优化结果

优化算法	无优化	ICA	改进 ICA
TOV 峰值(p.u.)	1.1149	1.0645	1.0732
TVI($\times 10^{-3}$)	1.2482	0.0000	0.0000
TSI($\times 10^{-2}$)	0.0000	100.0000	100.0000
代价函数值($\times 10^{-6}$)	-	-2.2649	-2.3077

5.5 本章小结

合理配置直流风机的关键控制参数与动态无功补偿的设备类型、设备容量，均可对暂态过电压起到一定改善作用，但各可控变量最优值的确定比较困难。特别在动态无功补偿中，还需要兼顾经济成本与抑制效果，找到最优解的难度

较大。因此本章考虑到风电经高压直流送出的物理背景，以及多目标优化的特殊要求，选择了对此类问题处理较为成熟的帝国竞争算法。并为避免提前收敛等问题，对算法进行了系列改进。同时对优化模型也进行了多目标问题转化为单目标问题的处理。最后综合考虑系统的性能约束，提出了一种综合控制参数与动态无功补偿优化配置且基于改进帝国竞争算法联合时域仿真的暂态过电压抑制策略。

完整抑制策略大致为两个主要步骤，首先进行单目标的关键控制参数优化，判断暂态过电压严重程度，输出最优控制参数配置，或继续进行动态无功补偿的设备类型选择与容量配置，进一步抑制过电压至符合系统运行要求，在文中给出了完整的抑制策略图。最后为验证所提策略的有效性，将改进 ICA 运用到算例系统的求解中。基于 MATLAB 编写算法主体架构，在 PSCAD 中搭建两机系统与改进 39 节点系统进行电磁暂态仿真。MATLAB 将优化所得控制变量值以过 PYTHON 为接口传给 PSCAD，PSCAD 仿真结果再回传 MATLAB 进行寻优，实现了优化算法与时域仿真的实时联合调用，最终得到配置方案。结果表明所提抑制策略对暂态过电压抑制效果显著，具有较好的实用性与普适性。

第6章 总结与展望

6.1 总结

基于风能与负荷逆向分布的情况，目前普遍采用高压直流输电实现风电的大规模送出。但与此同时，换相失败等故障会导致直流送端出现暂态过电压，严重时导致风机脱网，甚至系统崩溃。为抑制这种现象，本文围绕暂态过电压的产生机理、控制参数及动态无功补偿对过电压的抑制作用开展了研究。提出一种兼顾控制参数与动态无功补偿优化配置且基于改进帝国竞争算法联合时域仿真的暂态过电压抑制策略。主要研究成果归纳如下：

(1)理论分析了暂态过电压的产生、不同地点的暂态压升及不同因素带来的影响。首先将实际系统等效为含风场两机模型，重点关注换相失败和直流闭锁后系统的无功变化并兼顾各控制环节的作用，按故障发生阶段分析了过电压的产生原因。并在 PSCAD 中仿真获取无功、电压等关键量在故障时的动态曲线，验证前述原因分析的正确性。接着建立直流送端等值模型，提出不同地点暂态压升的估算方法，明确了后续需要讨论的过电压影响因素及可采取的抑制措施。并考虑不同故障时的不同冗余无功来源，研究了风机过电压的产生机理与脱网机制。最后揭示了风电渗透率、风场与换流站间电气距离、风机控制方式及直流输送功率对过电压的抑制规律，构建了过电压抑制效果分析的物理场景，在工程设计上具有一定参考意义。所得规律分别在 PSCAD 中进行了仿真验证。

(2)探讨了直流风机控制参数对过电压的抑制作用。基于前述对产生机理的分析，结合控制机制与辅助公式推导了主要控制环节的参数对过电压的抑制规律。接着根据 TVI 与 TSI 指标衡量过电压严重程度与抑制效果，并基于两机模型验证了理论规律。为降低参数变化对系统动态性能的影响且加快优化算法收敛，筛选了对过电压影响程度最高的关键控制参数。

(3)探讨了动态无功补偿对过电压的抑制作用。概述了无功补偿技术的发展与分类，基于设备运行特性及无功计算研究了 SC、SVC 和 STATCOM 的作用机制，进而搭建了控制系统模型。接着对比了设备无功响应能力、响应速度等主要性能的优劣，调相机在三种设备中展现出较好的综合特性。最后基于容量成本的函数绘制了成本曲线，基于仿真结果对比了各设备不同容量时对过电压的抑制能力强弱。由此验证了前述对比性能所得的理论结论，还可根据不同场景要求进行设备的初步选择。

(4)提出了一种综合控制参数与动态无功补偿配置且基于改进帝国竞争算

法联合时域仿真的暂态过电压抑制策略。第一步优化控制参数，判断暂态过电压越限与否，若仍越限则进一步对动态无功补偿优化配置，若未越限则输出配置方案，经过这两个主要步骤可以实现较好的暂态过电压抑制。接着通过建立目标函数和约束条件，对抑制策略中的控制参数搭建了考虑过电压抑制效果的优化模型，对无功设备搭建了兼顾抑制效果与经济成本的多目标优化模型，并对多目标优化存在的问题进行了实用化处理。然后对所使用的 ICA 算法进行了更适合目标模型的改进，同时提升了其收敛速度和收敛性能。接着完成了 PSCAD-PYTHON-MATLAB 的数据传递与交互迭代，实现了改进 ICA 与时域仿真的实时联合调用，可用来对所有控制变量进行优化配置。最后将抑制策略应用于两机系统与改进 39 节点系统中，对比无优化、标准 ICA 与改进 ICA 时故障后的过电压结果，暂态过电压得以有效抑制，表明了所提策略的有效性与通用性。

6.2 展望

本文在以下几方面仍有进一步研究的空间：

(1)本文所搭建算例的模型与数据较为理想化，作为方法原理的验证完全足够，但若应用到实际工程中，还需在实际系统模型中进一步验证；

(2)本文对补偿设备成本的讨论基于经验公式，与实际工程可能存在差别。以及随着市场波动及时间变化，器件的原材料价格、人工价格、生产工艺、生产水平等也会随之变化。实际的设备成本还需具体情况具体讨论，按真实情况来确定最终的成本函数；

(3)由于主要基于简单等效系统开展研究，因此在优化模型建立时，暂未考虑设备选址问题。复杂系统中设备安装地点的不同，以及分布式或集中式配置的不同，都可能会对系统暂态过电压抑制效果产生影响，因此在后续研究中可以增加对设备选址的考虑。

参考文献

- [1] 尹纯亚, 李凤婷, 王丹东, 等. 风电高渗透率交直流外送系统直流闭锁稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(03):95-102.
- [2] 林圣, 刘健, 刘磊, 等. 基于控制保护的高压直流输电系统换相失败抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19):6045-6059.
- [3] 国家能源局. 我国风电并网装机突破 3 亿千瓦[EB/OL]. (2021-11-30)[2023-02-13]. http://www.nea.gov.cn/2021-11/30/c_1310343188.htm.
- [4] 杜维柱, 罗亚洲, 李蕴红, 等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(09):3224-3239.
- [5] Faraji Hossien, Yavari Beigvand Narges, Hemmati Reza. Multi-objective and resilient control on hybrid wind farms under healthy/faulty and off-grid/grid-tied states[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 215(PB).
- [6] 赵梦阳. 抑制直流扰动下风电场暂态过电压的调相机配置方法研究[D]. 南京师范大学, 2021.
- [7] LIANG W, SHEN C, SUN H D, et al. Overvoltage mechanism and suppression method for LCC-HVDC rectifier station caused by sending end AC faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37: 1-4.
- [8] CHUN YA Y, LI F T. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage ecaused by commu-tationfailure[J]. IEEE Transactions on Power Sys-tems, 2021, 36(5):4764-4777.
- [9] 国家电网公司. 二〇一九年国家电网公司系统电网运行方式[R]. 北京: 国家电网公司, 2019.
- [10] 王小昂, 南晓强, 张谦. 雁淮直流过渡阶段送端低电压及暂态过电压问题研究[J]. 山西电力, 2020(01):7-10.
- [11] CAO Z H, LI X, YAO R H, et al. Calculation method of transient overvoltage of sending-side grid caused by commutation failure[C]//IEEE 3rd International Electricaland Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2019.
- [12] Eman Ahmed Awad, Ebrahim A, Badran. Mitigation of transient overvoltages in microgrid including PV arrays [J] . IET Generation , Transmission & Distribution, 2020, 14(15).
- [13] 赵学明, 李永丽, 孙广宇, 等. 换相失败对含风电场的交直流混联系统送端过

- 电压的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(11):3666-3673.
- [14]Liu Xiaofei, Zhang Pei, Deng Xiaoyang, et al. Hierarchical overvoltage predictive control scheme for a DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 217.
- [15]屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11):197-205.
- [16]陈厚合, 鲁华威, 王长江, 等. 抑制直流送端系统暂态过电压的直流和风电控制参数协调优化[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10):46-55.
- [17]Yin C, Li F. Analytical Expression on Transient Overvoltage Peak Value of Converter Bus Caused by DC Faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2021(36-3).
- [18]李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(01):1-8.
- [19]张起瑞, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 抑制直流单极闭锁引起大规模风电机组脱网的直流控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10):3528-3537.
- [20]刘琳, 雷霄, 孔祥平, 等. 抑制换相失败期间送端电网过电压的控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(03):60-66.
- [21]滕予非, 汤涌, 张鹏, 等. 基于直流输电无功控制的多直流馈出电网交流系统过电压最优抑制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(12):3846-3853.
- [22]ZHANG T, YAO J, PEI J X, et al. Coordinated control of HVDC sending system with large-scale DFIG-based wind farm under mono-polar blocking fault[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119:105943.
- [23]Xiaoyue Chen, Zeyu He, Huashi Wu, et al. Open-phase temporary overvoltage before and after an intermediate subsation accessing a long distance transmission line[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 15(4).
- [24]尹纯亚, 李凤婷, 周识远, 等. 基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10):150-154+161.
- [25]LI F F, CHEN Q, LIN X, et al. Simulation on power characteristic of UHVDC during commutation failure and DC block[C]//2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference(EPEC). Saskatoon, SK, Canada:IEEE, 2017:1-6.
- [26]ZHANG S, QIN X H, ZHU B W, et al. An ESS-based approach for mitigation of REG stemporary overvolt-age caused by UHVDC commutation failure[C]//IEEE Sustainable Power and Energy Conference:Energy Transition and Energy Internet (ISPEC), Chengdu, China, 2020.

- [27]ZHENG Z X, REN J, XIAO X Y, et al. Response Mechanism of DFIG to Transient Voltage Disturbance Under Commutation Failure of LCC-HVDC System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6):2972-2979.
- [28]林安妮, 黄永章, 林伟芳, 等. 不同动态无功补偿装置对直流系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(04):116-122.
- [29]Yu S, Ju L, Liao S, et al. Transient overvoltage control for a wind farm based on goal representation adaptive dynamic programming[C]//International Conference on Power System Technology. IEEE, 2014.
- [30]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.
- [31]ZHANG Y, GOLE A M. Comparison of the transient performance of STATCOM and Synchronous condenser at HVDC converter stations[C]//11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK:IET, 2015:1-8.
- [32]林安妮. 超高占比新能源电网的电压稳定性及暂态过电压抑制措施研究[D]. 华北电力大学(北京), 2020.
- [33]XUE A C, YUE L, ZHANG J H, et al. A new quantitative analysis method for overvoltage in sending end electric power system with UHVDC[J]. IEEE Access, 2020, 8:145898-145908.
- [34]JIN X, NIAN H. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVdc system under commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9):10265-10277.
- [35]贾俊川, 金一丁, 赵兵, 等. 风机低电压穿越控制对系统暂态过电压的影响及优化[J]. 电网技术, 2021, 45(02):526-533.
- [36]邹乐, 吴学光, 寇龙泽, 等. 电网电压对称骤升下双馈风力发电系统的改进控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(04):1360-1367.
- [37]张学广, 邱望明, 方冉, 等. 双馈风电机组静止坐标系下阻抗建模及次同步谐振抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(06):41-48+106.
- [38]Dong Z, Li Z, Du L, et al. Coordination Strategy of Large-Scale DFIG-Based Wind Farm for Voltage Support With High Converter Capacity Utilization[J]. IEEE, 2021(2).
- [39]Saeed Sarmad, Asghar Rafiq, Mehmood Faizan, et al. Evaluating a Hybrid Circuit Topology for Fault-Ride through in DFIG-Based Wind Turbines[J]. Sensors, 2022, 22(23).

- [40]朱丽萍,刘文颖,邵冲,等.基于调相机与 SVC 协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(06):107-115.
- [41]金一丁,贺静波,李光辉,等.风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(二):送端风电机组暂态无功电压特性与作用机理分析[J].中国电机工程学报,2022,42(13):4738-4749.
- [42]索之闻,李晖,张锋,等.高比例新能源直流送端系统分布式调相机优化配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):133-141.
- [43]鲁华威.抑制直流送端系统暂态过电压的参数优化和协调控制方法研究[D].东北电力大学,2020.
- [44]范心明.面向风电场并网的双端与多端柔性直流输电系统控制策略研究[D].华南理工大学,2014.
- [45]ZHENG Z X, REN J, XIAO X Y, et al. Response mechanism of DFIG to transient voltage disturbance under commutation failure of LCC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6):2972-2979.
- [46]刘其辉,洪晨威,逢思敏,等.基于弹性系数的双馈风电机组控制参数对次同步振荡作用分析及调整方法[J].电工技术学报,2022,37(14):3528-3541.
- [47]何国庆,王伟胜,刘纯,等.风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(一):送端风电机组暂态无功电压建模[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4391-4405.
- [48]李欣蔚.交直流电网动态无功补偿优化配置研究[D].华北电力大学(北京),2019.
- [49]王永辉,宋广磊,刘冰.动态无功补偿装置的能力比较[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(05):18-26.
- [50]王蒙,李庆海,葛景,等.提升新能源送出能力的多类型无功补偿装置优选[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(04):8-13+21.
- [51]周莹坤,孙华东,徐式蕴,等.提升电网电压支撑强度的调相机优化配置方法[J].电网技术,2022,46(10):3848-3856.
- [52]彭增丽.直流启动过程暂态过电压机理及其抑制方法研究[D].华南理工大学,2020.
- [53]Tina Giuseppe Marco, Maione Giovanni, Licciardello Sebastiano. Evaluation of Technical Solutions to Improve Transient Stability in Power Systems with Wind Power Generation[J]. Energies, 2022, 15(19).
- [54]Mo Jingshan, Yan Wei, Chen Xiaolin, et al. Parameter setting method of coordinated control between synchronous condenser and DC system based on

- dynamic reactive power optimization[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(11).
- [55]Döşoğlu M, Kenan. Enhancement of LVRT Capability in DFIG-Based Wind Turbines with STATCOM and Supercapacitor[J]. Sustainability, 2023, 15(3).
- [56]段友莲, 戴林东, 郑连清. 静止无功补偿器的优化配置方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(05): 12-17.
- [57]Xu Guorui, Li Ruizhi, Luo Chaolong, et al. Optimal design of q-axis field winding structure of dual-excited synchronous condenser[J]. IET Electric Power Applications, 2022, 17(1).
- [58]Masood Nahid-Al, Mahmud Sajjad Uddin, Ansary Md Nazmuddoha, et al. Improvement of system strength under high wind penetration: A techno-economic assessment using synchronous condenser and SVC[J]. Energy, 2022, 246.
- [59]Pavan Kumar Yellapragada Venkata, Kumar Lagudu Venkata Suresh, Ananth Duggirala Venkata Naga, et al. Performance Enhancement of Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Farms With STATCOM in Faulty HVDC Grids[J]. Frontiers in Energy Research, 2022.
- [60]刘炳辰. 高比例新能源送出系统动态无功补偿方案研究[D]. 华北电力大学(北京), 2021.
- [61]林圣, 兰菲燕, 刘健, 等. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(06): 3-16.
- [62]王熙纯, 刘纯, 林伟芳, 等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4612-4621.
- [63]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(06): 1839-1844.
- [64]年珩, 金萧, 李光辉. 特高压直流换相失败对送端电网风机暂态无功特性的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4111-4122.
- [65]冯茜. 基于改进粒子群算法的多目标优化及其应用[D]. 北京科技大学, 2022.
- [66]Su K. Logistics Distribution Location Algorithm Based on Improved Imperial Competition Algorithm[J]. Scientific programming, 2021(Pt.12): 2021.
- [67]Jayasanthi M, Ramamoorthy V, Parthiban A. Improved ICA algorithm for ECG feature extraction and R-peak detection[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2020, 35(1).
- [68]Zhang Yahui, Hu Xiaofeng, Wu Chuanxun. Improved imperialist competitive

algorithms for rebalancing multi-objective two-sided assembly lines with space and resource constraints[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(12).

- [69]Liu Chunfeng, Yang Xiao, Wang Jufeng. Optimization of product line considering compatibility and reliability via discrete imperialist competitive algorithm[J]. RAIRO-Operations Research, 2021, 55(6):3773-3795.