



## 填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

## 一、个人申报

**（一）基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】**

### 1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

在研究生阶段，我系统学习了综合能源系统集成优化、新能源发电与变流技术、电气设备健康管理、高阶工程认知实践、工程中的有限元等专业核心课程，此外，我还修读了新时代中国特色社会主义理论与实践、自然辩证法、工程伦理等人文社会课程，硕士期间课程平均成绩达到85分。

通过学习专业核心课程，我一方面扎实掌握了电气工程领域的基本理论和专业技术知识，另一方面从人文社会课程中提升了辩证思维能力，为我后续开展科学研究奠定了坚实基础。同时，积极参加课题组会议的过程极大拓展了我的科研视野，使我及时掌握学术前沿动态，了解电气工程领域的最新技术、规范和行业标准。

在研究进行的过程中，我积极参与电力系统安全稳定相关项目研究，利用自身所学知识解决实际工程中的复杂技术问题，并提出了多项创新性的建议和解决方案。通过项目实践，我深入理解了电气设备控制设计的流程和方法，包括模型建立、理论推导、稳定性校核等关键环节。同时，我还掌握了基于专业软件平台的仿真技术，能够搭建控制模型，根据具体需求选择合适的控制策略并进行优化，成功获得最优控制策略。通过一次次的软件调试和优化实践，我进一步强化了专业软件的运用能力。

综上所述，我具备扎实的电气工程专业基础理论知识和丰富的专业技术经验，能够有效地将专业知识应用于电气工程，胜任相关技术任务。

### 2. 工程实践的经历(不少于200字)

我于2023年7月至2024年8月在国网冀北电科院进行了为期一年的工程实践，专业实践考核成绩为84分。在此期间，我参与了由国网冀北电科院承担的国家总部科技项目《适用于新能源弱送端电网的电压支撑型SVG控制性能提升方法研究》。该项目的目标是提高SVG电压支撑性能，研究针对暂态过电压的控制优化方案，降低系统整体运行成本。

在项目实施过程中，我成功建立了SVG的控制系统分析模型，深入研究并优化了考虑暂态过电压抑制的控制策略。与此同时，我还研究了SVG针对不对称故障的过电压抑制方法，实现了设备电压支撑性能提升。此外，我搭建仿真模型并编写计算代码进行了仿真分析，最终验证了所提出方案的有效性，为电网中无功补偿设备的装配提供了指导。

这段实践经历让我有机会将所学理论应用于实际工程项目中，不仅加深了我对专业的理解、提升了我解决技术难点的能力，也极大促进了我职业素养的培养。由于研究进度安排紧凑，团队成员工作反馈及时，我对敬业

精神有了更好的理解。同时，团队成员们认真负责的工作态度、严谨细致的工作习惯以及勇于创新的工作理念都对我未来的电气工程师生涯奠定了坚实基础。

### 3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例（不少于1000字）

#### 项目背景

在世界经济大发展的今天，人类面临着化石能源日益枯竭、环境压力日益增加等诸多问题，中国乃至世界均需要对能源结构进行战略性调整。2020年9月中国于七十五届联合国大会明确提出2030年“碳达峰”和2060年“碳中和”的目标，为响应“双碳”目标，能源行业开始构建以清洁、低碳、安全、高效为主要特征的新型电力系统。新型电力系统的建设需要从传统能源向可再生能源的过渡，而中国的可再生能源储量丰富，全国可开发和利用的风能储量有2.53亿kW，太阳能资源理论储量达每年17000亿吨标准煤。不仅如此，由于风能与太

太阳能资源分布集中，中国具备开发大型风电基地、大型太阳能基地的条件。随着新能源发电与并网技术的不断成熟，风电、光伏等新能源发电设备装机容量稳定增加，截至2020年底，全国风电、光伏累计装机容量已达到5.34亿千瓦，预计2030年将达到16.4亿千瓦。在此背景下，我国送端电网呈现高比例新能源新特征。

以新能源为主体的新型电力系统的主要特征之一就是高比例新能源和高比例电力电子设备。不同于出力稳定、具有电网支撑能力的同步机，电力电子设备表现为弱电压支撑能力。因此随着新能源占比的增加、同步机占比的减小，电网电压支撑强度变弱，低短路比弱电网特征凸显（系统无功-

电压灵敏度升高），弱送端电网稳定问题频发。一方面，交流短路故障恢复期间，由于控制延时，新能源机组无法及时撤回低电压穿越状态发出的无功电流，从而导致交流系统中无功盈余，再加上交流电网等效电抗较大（其原因在于系统短路比较低），新能源端口电压抬升明显，容易发生暂态过电压问题，触发新能源连锁脱网事故，威胁电网的安全稳定运行；另一方面，常规运行时，由于缺乏有效的无功功率支撑，低短路比弱送端电网场景下，新能源机组端口电压跌落明显，容易发生静态电压稳定问题；此外，低短路比弱送端电网场景下，变流器与电网交互作用明显，系统宽频带振荡稳定问题突出。针对上述问题，在新能源场站附近配置SVG等无功补偿辅助装备，是目前提升弱送端电网电压支撑能力，改善新能源安全稳定运行水平的重要举措之一。关于弱送端电网的电压支撑型SVG控制性能提升方法研究尚不完善，仍存在如下几个关键问题：1）作为常用的无功补偿装备，调相机接入电网可等效于提升电网的电压支撑强度，同样可改善新能源并网的响应性能。相比于调相机，配置SVG的优势在哪，目前尚未有定论。2）跟网型SVG采用基于锁相环同步的级联型双环矢量控制策略，当发生扰动时，SVG存在多时间尺度下不同控制环（同步环、电压外环、电流内环和电压前馈等环节）间交互作用且交互作用复杂，各控制环节如何影响SVG的暂态响应性能尚不清晰。3）不对称故障过程中，基于常规控制模式的SVG存在严重的暂态电压问题，然而SVG暂态电压失稳演变规律及其关键影响因素作用规律尚不清晰，缺乏有效的改进型SVG不平衡控制方法。

#### 研究内容

《适用于新能源弱送端电网的电压支撑型SVG控制性能提升方法研究》的具体研究内容如下：SVG与调相机技术特点对比；SVG控制优化方法研究；SVG不平衡控制方法研究。

首先，梳理国内现有新能源系统中SVG相关技术标准与性能指标要求，并调研国内新能源场站及汇集站SVG装置设计原则、关键设备选型原则依据，明确稳态

、对称故障、非对称故障下SVG的控制方式和输出特性，整理汇总目前SVG在设计、选型等方面存在的问题；第二步，推导SVG与调相机故障过程中端电压的解析表达式，从而得到端电压关于设备各参数的解析关系，并基于灵敏度分析法推导设备端电压关于各参数的灵敏度解析表达式，在此基础上分析各参数对设备端电压影响的作用规律；第三步，针对对称故障场景，结合已有影响因素作用规律分析结果，筛选可有效抑制过电压问题的关键参数。考虑到不同控制环节所在的时间尺度不同，制定各环节响应时间的配合原则，并结合灵敏度分析结果设计SVG控制参数优化方法，最大限度地抑制过电压问题。针对非对称故障场景，根据故障类型不同，分析正负序分量不平衡度较为严重的电气量，选择控制目标，在此基础上通过添加辅助控制环节的方式并结合灵敏度分析结果，设计最大限度抑制不平衡量的改进控制策略。

#### 研究成果

研究提出了针对SVG电压支撑性能的控制优化方法，降低无功补偿设备装配成本。依托此项目，在EI期刊《电力自动化设备》以第一作者身份投稿并录用了《基于等效阻抗优化的跟网型变流器暂态过电压抑制方法》一文；在EI会议上以第一作者身份发表了《Optimization Scheme of STATCOM Parameters for Temporary Overvoltage Suppression》一文。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
基于等效阻抗优化的跟网型变流器暂态过电压抑制方法	一级期刊	2025年03月11日	电力自动化设备	1/6	EI期刊收录
Optimization Scheme of STATCOM Parameters for Temporary Overvoltage Suppression	会议论文	2024年08月22日	PSGEC2024	1/6	EI会议收录

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

<b>(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况</b>	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 85 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1.1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 84 分
<b>本人承诺</b>	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名：尚景</p>	



## 浙江大学研究生院 攻读硕士学位研究生成绩表

学号: 22260124	姓名: 尚若愚	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 电气工程	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 24.0学分		已获得: 26.0学分		入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:			授予学位:					
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	85	专业学位课	2022-2023学年春季学期	电气装备健康管理		2.0	88	专业选修课
2022-2023学年秋季学期	新能源发电与变流技术		2.0	93	专业学位课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	80	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	综合能源系统集成优化		2.0	85	专业学位课	2022-2023学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	免修	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	83	专业学位课	2022-2023学年春夏学期	工程伦理		2.0	76	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	工程中的有限元方法		2.0	100	专业选修课	2022-2023学年夏季学期	“四史”专题		1.0	86	公共选修课
2022-2023学年秋冬学期	高阶工程认知实践		3.0	80	专业学位课	2023-2024学年秋季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	88	公共学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	90	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	
2022-2023学年春季学期	研究生英语		2.0	免修	公共学位课						

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。  
2. 备注中“\*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-06-03



# 基于等效阻抗优化的跟网型变流器暂态过电压抑制方法

尚若愚<sup>1</sup>, 谢欢<sup>2</sup>, 刘昕宇<sup>3</sup>, 李长宇<sup>2</sup>, 谢镛辰<sup>3</sup>, 辛焕海<sup>1,3</sup>

(1. 浙江大学工程师学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 新能源大规模接入电网加剧了交流电网故障恢复阶段的暂态过电压问题。针对电磁暂态时间尺度的暂态过电压问题, 首先建立了跟网型变流器故障恢复期间暂态多过程等效模型。基于所提等效模型, 揭示了系统暂态过电压发生机理。进一步地, 通过分析内环控制参数对暂态过电压水平的影响规律提出了参数优化方案。在此基础上, 由于优化参数可能加剧锁相环与内环的交互, 造成小扰动同步失稳, 因此根据二者的交互动态提出了参数优化边界, 并结合变流器过流能力形成了基于内环等效阻抗优化的暂态过电压抑制流程。最后, 电磁暂态仿真结果表明, 所提模型能较为准确地反映暂态过电压机理, 所提方法能有效地抑制暂态过电压风险。

**关键词:** 跟网型变流器; 内环等效阻抗; 小扰动同步失稳; 暂态过电压抑制; 过流容量

**中图分类号:**

**文献标志码:** A

**DOI:** ××××××××

## 0 引言

近年来, 我国正加快建设以新能源为主体的新型电力系统, 由于新能源设备基于电力电子设备并网, 电力系统逐渐呈现出高比例可再生能源和高比例电力电子设备的“双高”特征<sup>[1-3]</sup>。在电力电子设备低抗扰特性影响下, 电力系统的电压支撑能力减弱, 故障恢复期间的暂态过电压风险愈发严重。2011年我国西北电网以及2017年美国南加州均发生了由暂态过电压导致的新能源设备大量脱网事故<sup>[4-6]</sup>。暂态过电压风险已成为威胁新能源安全稳定运行的重要因素之一。

已有大量文献针对暂态过电压的机理展开了研究, 如雷击过电压、操作过电压等。不同于传统电力系统中的过电压类型, 新能源自身引发的暂态过电压正在逐渐被关注<sup>[7]</sup>。按时间尺度划分, 亚周波过电压主要是由变流器的电容特性引起<sup>[8]</sup>; 文献<sup>[9]</sup>则讨论了锁相环时间尺度下双馈风机产生暂态过电压的机理; 在准稳态尺度下, 文献<sup>[10]</sup>指出在无功-电压灵敏度较高的弱电网中, 新能源设备低电压穿越策略撤回延时造成的暂态无功盈余是引发过电压的主要因素。在此基础上, 文献<sup>[11]</sup>分析了锁相环尺度的暂态过程, 文献<sup>[12]</sup>将低穿策略的控制切换过程等值为电路模型, 在准稳态下较为准确的量化了外环主导下的暂态过电压。然而, 大量

实际录波和仿真实验数据表明, 新能源引发的暂态过电压峰值往往出现在内环所处的电磁暂态时间尺度范围内, 而内环视角下的暂态过电压机理尚未得到充分关注。为此, 需要进一步探究内环动态对暂态过电压的影响。

在暂态过电压抑制方面, 文献<sup>[13]</sup>建立了锁相环暂态模型, 探究了锁相环误差对暂态过电压的影响并提出了过电压抑制方案。针对锁相环的过电压抑制方法主要通过锁相误差的补偿或PI参数整定实现, 但此类方法在弱电网下受制于电网强度难以应用。文献<sup>[14-16]</sup>从外环尺度入手, 研究了设备有功与无功电流对端口暂态电压特性的影响机制, 并通过改进故障穿越策略达成暂态过电压抑制目标, 然而改变低穿无功增益系数会影响设备故障期间无功支撑水平, 可能导致设备因低电压脱网。文献<sup>[17]</sup>提出了基于虚拟磁链的改进方案, 通过对内环结构的调整改变设备暂态无功响应特性从而抑制暂态过电压, 但此方案无法完全发挥设备的过电压抑制能力, 在弱电网下的过电压抑制效果有限。由此可见, 目前的控制优化方案难以解决电磁暂态时间尺度的暂态过电压问题, 有待进一步研究。

为此, 本文针对跟网型电压源型变流器(Voltage Source Converter, VSC)提出了一种基于等效阻抗优化的暂态过电压抑制方法。首先, 对故障恢复暂态期间的动态进行分析, 建立了VSC暂态等效模型, 从电路阻抗角度说明了暂态过电压的产生机理。其次, 研究了VSC内环控制参数对过电压的影响机制, 并提出参数优化方案。再次, 基于小扰动稳定性分析得出了参数边界, 并结合VSC过流能力形成过电压抑制流程。最后,

收稿日期: yyyy-mm-dd; 修回日期: yyyy-mm-dd

在线出版日期:

国网冀北电力有限公司科技项目(52018K22001M)

Project Supported by the Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power Company Limited(52018K22001M)

在 PSCAD/EMTDC 中验证了该方案对新能源送端交流系统过电压抑制的有效性。

## 1 新能源并网系统建模

### 1.1 系统建模

跟网型 VSC 单机并网系统拓扑及控制框图如图 1 所示。图中,  $L_f$ 、 $C_f$  构成滤波器;  $R_g$ 、 $L_g$  分别为线路电阻与线路电感。  $U_{abc}$ 、 $U_{pabc}$ 、 $I_{abc}$  分别是 VSC 桥臂输出电压、公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)电压和 VSC 桥臂输出电流;  $U_{cd}$ 、 $U_{ca}$  和  $U_{pd}$ 、 $U_{pa}$  分别为 VSC 桥臂输出电压和 PCC 电压的  $dq$  轴分量;  $I_{gd}$ 、 $I_{ga}$  为 VSC 输出电流的  $dq$  轴分量;  $I_{dref}$ 、 $I_{qref}$  分别为机组有功、无功电流指令值;  $G_{ff}(s)$  是内环电压前馈环节的传递函数,其主要功能在于抵消电网电压扰动对电流控制器的影响,其传递函数为  $G_{ff}(s)=1/(1+sT_{ff})$ ;  $G_{PI,cc}(s)$  为电流内环 PI 控制器传递函数,其中比例增益和积分增益分别为  $k_{ip}$  和  $k_{ii}$ 。

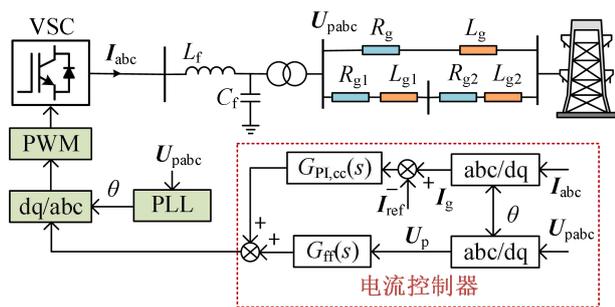


图 1 跟网型 VSC 并网系统拓扑图

Fig.1 Topology diagram of grid-connected system with VSC

关于  $k_{ip}$  和  $k_{ii}$  的设计方法已有许多研究成果 [18,19], 其中应用最为广泛的是基于数字控制系统采样频率和滤波电感的方案。电流控制器的输出信号作为 PWM 的参考电压, 由于 PWM 通常采样频率在 10kHz 以上, 其延迟可忽略。因此在内环交叉解耦项的作用下, 内环动态可表示为:

$$\begin{cases} U_c = G_{PI,cc}(s)(I_{ref} - I_g) + G_{ff}(s)U_p \\ U_c - U_p = sL_f I_g \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $U_c$  为  $dq$  坐标轴下的 VSC 桥臂输出电压矢量,  $U_p$  为  $dq$  坐标轴下的 PCC 电压矢量,  $I_g$  为  $dq$  坐标轴下的 VSC 输出电流矢量,  $I_{ref}$  为  $dq$  坐标轴下的电流指令矢量。锁相环通过  $U_{pq}$  控制输出相位  $\theta$ , 实现并网点电压相位跟踪。锁相环比例增益和积分增益分别为  $k_{ppll}$  和  $k_{ipll}$ 。

### 1.2 暂态多过程等效建模分析

在传统的参数设计方案中, 为保持 VSC 的控制性能同时防止各环节之间的交互, 通常将控制系统设计为级联结构, 其中内环响应速度快于锁相环与外环 [20], 因此按照内环是否完全响应可将 PCC 电压动态在故障恢复期间分为两个过程。其中, 第一个过程由 LC 滤波器和内环动态主导, 此时外环响应很小, 可以忽略, 认为电流指令值不变; 第二个过程中内环和 LC 滤波器动态响应完毕, 此时电流指令值在外环动态下开始变化, 且锁相环动态对该阶段电压特性影响显著。根据上述分析, 可分阶段在  $dq$  同步坐标系下对 VSC 的故障恢复过程进行暂态等效建模:

#### (1) 阶段 I: LC 滤波器与内环动态主导

故障恢复瞬间, 内环 PI 环节中积分器时间常数较大, 难以快速响应电路动态, 因此 LC 滤波器的动态首先起主导作用 [21], 其初值响应可等效为图 2(a)中电压源。故障持续期间电路元件储存的初值衰减后, 内环动态占据主导, 如式(1)所示。根据式(1)可得:

$$I_g = \frac{1}{R_1 + R_2 + sL_{eq} + \frac{1}{sC_{eq}}} \left[ \left( R_2 + \frac{1}{sC_{eq}} \right) I_{ref} - U_p \right] \quad (2)$$

由式(2)可知, 在理想电压前馈环节下, 即当  $G_{ff}(s)=1$  时, VSC 输出电流完全不受端口电压影响。反之, 当计及前馈环节动态时, VSC 输出电流不再只受控于电流指令值。因此, 理想前馈下的 VSC 外特性表现为独立电流源, 其电压支撑能力较弱, 可以通过调节前馈系数提高设备电压支撑能力。

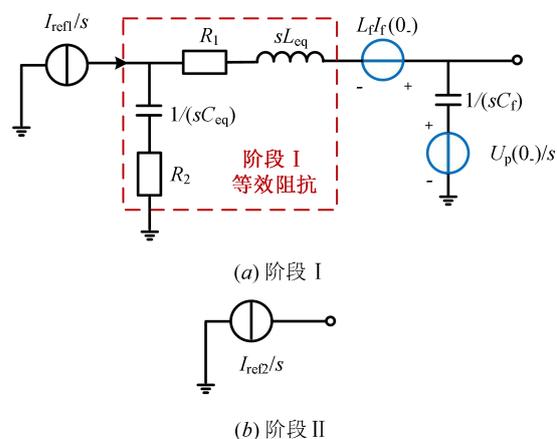


图 2 设备等效电路图

Fig.2 Equivalent Circuit for VSC

结合式 (2), 设备等效阻抗表示为  $Z_{vsc}(s) = [G_{PI,cc}(s) + sL_f] / [1 - G_{ff}(s)]$ 。其在不同控制

参数下的 bode 图如图 A1 所示。由于传统内环设计方案中  $k_{ii}$  为电流控制器闭环带宽  $\alpha_c$  与滤波器电阻的乘积，而滤波器电阻正常工况下为足够小的值，同时由图 A1 可知  $k_{ii}$  只影响极低频段的 VSC 等效阻抗，为便于分析，在建立等效阻抗模型时将积分常数视为 0<sup>[20]</sup>。设备等效阻抗可简化为  $Z_{vsc}(s) = (k_{ip} + sL_f) / [1 - G_{ff}(s)]$ ，如图 2(a)所示。其中， $R_1 = k_{ip}$ ， $R_2 = L_f / T_{ff}$ ， $R_{eq} = R_1 + R_2$ ， $L_{eq} = L_f$ ， $C_{eq} = T_{ff} / k_{ip}$ 。由此可知，增大  $T_{ff}$ 、减小  $k_{ip}$  都可以减小设备等效阻抗，同时也会减小内环控制带宽。

## (2) 阶段 II：低穿电流指令与锁相环动态主导

若阶段 I 结束后设备还未及时响应外界电压变化，即 VSC 仍按低穿模式给出的指令值输出电流，则其输出的多余能量将造成系统中的稳态过电压<sup>[12]</sup>。此时由于内环动态响应完毕， $s$  趋近于 0，设备等效阻抗由  $R_{eq}$  主导转为  $C_{eq}$  主导，可将 VSC 等效为理想电流源，其大小由低穿无功增益系数与锁相环参数共同决定，如图 2(b)所示。

通常情况下，故障清除 30~50 ms 后 PCC 即可检测到电压恢复并切除低穿，因此故障清除 30~50 ms 内出现的暂态过电压可通过调节内环参数解决，本文拟从内环主导的阶段 I 入手设计参数优化方案。

## 2 内环视角下的暂态过电压机理

### 2.1 基于等效阻抗的暂态过电压机理分析

根据暂态阻抗模型，本节将更加直观的阐述暂态过电压机理。基于叠加定理，可将故障发生瞬间与故障恢复过程的电流特性从电路上等效为电流源的叠加，如图 3 所示。 $I_{f1}$  为系统故障持续期间故障节点向短路点注入的故障电流， $I_{f2}$  为故障恢复过程中短路点向故障节点反向注入的故障恢复电流。故障恢复过程中产生的暂态过电压由反向注入的  $I_{f2}$  引起，而  $I_{f2}$  由线路阻抗、低穿无功增益系数和锁相环动态决定<sup>[12]</sup>。

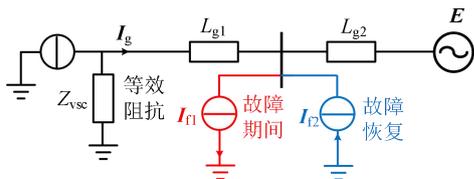


图 3 故障等效电路图

Fig.3 Equivalent Circuit for Fault Process

由故障等效电路图可直观表现出设备等效阻

抗大小对  $I_{f2}$  分流过程的影响，从而依据设备等效阻抗对端口电压的影响论述暂态过电压机理。若将  $I_{f2}$  视为故障恢复过程的扰动能量，当等效阻抗中  $R_{eq}$  占主导时，设备为扰动能量提供较大的耗散通路，从而抑制 PCC 过电压，且抑制效果与  $R_{eq}$  大小呈负相关；而当等效阻抗中  $C_{eq}$  占主导时，设备几乎无法提供耗散通路，扰动能量注入电网从而助增 PCC 过电压。

由上一节阻抗模型可知，阶段 I 对应  $R_{eq}$  主导过程，且  $R_{eq}$  大小可通过控制参数调节，进而影响 PCC 过电压；而阶段 II 对应  $C_{eq}$  主导过程，因此设备无法吸收扰动能量提供通路，导致能量注入电网造成 PCC 过电压。由于阶段 II 过电压与内环动态无关，且其计算过程在文献[12]中已详细论述，因此本文对该阶段不再赘述。基于暂态等效阻抗的阶段 I 过电压估算方法如附录 A 所示。

### 2.2 内环参数对暂态过电压的影响机制

由于滤波电感  $L_f$  在过电压频段对等效电流源影响较小，将其忽略后阶段 I 中 VSC 输出电流  $dq$  轴分量计算公式可由式(1)推导得出：

$$I_g = I_{ref} - Y_{vsc} U_p \quad (3)$$

式中， $Y_{vsc}$  为阶段 I 设备等效导纳矩阵。在忽略锁相环误差的情况下， $U_{pq} = 0$ ，且内环等效导纳矩阵中没有非对角元，因此  $q$  轴输出电流由指令值决定，即  $I_{gq} = I_{qref}$ 。由式(3)可知，调节设备等效阻抗主要对  $d$  轴电流产生影响。

使用传统参数时，设备输出电流快速跟随低穿指令值。当 PCC 电压出现严重跌落，低穿指令值中  $q$  轴无功分量占据主导，即 VSC 提供的故障恢复电流主要为  $q$  轴分量，因此 VSC 有功电流对暂态过电压产生的影响可忽略不计。根据式(3)可知，在不使用传统参数的情况下，可以通过调节控制参数改变设备暂态等效阻抗，使得有功电流对暂态过电压产生显著影响。接下来从潮流特性出发说明有功电流对过电压的影响。列写输电线路稳态下  $dq$  同步坐标系的电路方程如下：

$$\begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -X \\ X & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{gd} \\ I_{gq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $R$  和  $X$  分别为线路电阻与线路电抗， $E_d$ ， $E_q$  分别为无穷大电网电压的  $dq$  轴分量， $E$  为无穷大电网电压幅值。由于稳态下锁相环精准跟踪电网相位，可获得方程如下：

$$U_{pd} = \sqrt{E^2 - (I_{gd}X + I_{gq}R)^2} + I_{gd}R - I_{gq}X \quad (5)$$

设定流出设备为输出电流正方向，故障期间 VSC 在低穿作用发出无功以支撑电压，从而  $I_{gq} < 0$ 。依据式(5)给出的输出电流与暂态过电压的关系，若  $I_{gq}$  保持不变，设备发出有功电流时过电压幅值与  $I_{gd}$  幅值呈正相关，设备吸收有功电流时过电压幅值与  $I_{gd}$  幅值呈负相关，而  $I_{gd}$  受设备等效阻抗影响，相量关系如图 A2 中  $U_{p1}$  与  $U_{p2}$  所示。

当给定设备可承受的过电压限值  $V_1$  和  $q$  轴输出电流后，可计算出为满足过电压约束所需要的有功电流  $I_{gdm}$  如式(6)所示。

$$I_{gdm} = -\frac{RV_1 - \sqrt{(RV_1)^2 - (R^2 + X^2)[(V_1 + I_{q0}X)^2 + (I_{q0}R)^2 - E^2]}}{R^2 + X^2} \quad (6)$$

其中， $I_{q0} = k_1(0.9 - U_{p0})$ ， $k_1$  为低穿期间的无功增益系数， $U_{p0}$  为故障持续阶段 PCC 电压。

需要注意的是， $I_{gdm}$  的计算过程中忽略了锁相环动态，而实际工况中锁相环带宽小于内环带宽，因此阶段 I 中锁相环无法及时准确跟踪实际相位，其输出相位与 PCC 实际相位之间的相量关系如图 A2 中  $U_{p2}$  与  $U_{p3}$  所示。 $U_{p3}$  为锁相环误差下的电压相量，在此相位差  $\theta$  的影响下，计算得出的  $I_{gdm}$  超出实际需要，符合保守性设计原则，因此忽略阶段 I 中锁相环误差是可行的。

### 3 基于等效阻抗优化的暂态过电压抑制方法

#### 3.1 基于等效阻抗的参数优化

由式(3)可知，减小 PI 参数可减小暂态等效阻抗，从而在故障恢复期间  $I_{gd} < 0$  的情况下增大  $|I_{gd}|$ 。对式(3)进行反拉氏变换可求得过电压约束下  $I_{gd}$  表达式：

$$I_{gd}(t) = \mathcal{L}^{-1}[I_{dref}(s) - Y_{vsc}(s)V_1(s)] \quad (7)$$

根据式(7)， $I_{gd}$  随  $k_{ip}$  与  $T_{fr}$  变化趋势如图 B1 所示，其中  $I_{gd}$  为标么值。曲面与平面相交的曲线即可表示满足过电压约束的  $k_{ip}$ 、 $T_{fr}$  参数集，参数集中设备等效阻抗在对应频段内相等。由于较大的  $T_{fr}$  会导致 VSC 故障期间动态响应能力减弱，因此  $T_{fr}$  需尽可能小，而由曲线可知， $k_{ip}$  随  $T_{fr}$  单调递增。为满足过电压约束， $k_{ip}$  也需相应地小。

#### 3.2 基于小干扰稳定性分析的参数边界

上述优化参数从机理上抑制了暂态过电压的同时也改变了内环控制带宽，可能造成系统失稳风

险。由于暂态稳定问题与暂态过电压问题时间尺度不对应，本文主要考虑小扰动稳定性。在 LC 滤波器参数不发生改变的情况下，由滤波器动态主导的谐振稳定性受内环带宽调整的影响可忽略不计，因此主要关注小干扰同步稳定性。为避免锁相环与内环动态交互造成的同步失稳问题，在基于采样频率的传统内环设计方案中通常令内环控制带宽大于锁相环，从而减少二者动态交互的频段<sup>[22]</sup>。采用优化方案后，可能导致内环控制带宽减小引发锁相环与内环交互失稳问题，因此需要明确导致锁相环与内环交互的参数边界。而由于前馈系数对交互失稳问题影响较小，可将  $k_{ipmin}$  作为参数边界以保证 VSC 并网系统的小扰动稳定性。

为获取  $k_{ipmin}$ ，需要分析锁相环影响下的系统动态。计及锁相环影响的 VSC 并网系统等效框图如图 B3 所示， $G_{unll}(s)$ ， $G_{ibll}(s)$ ， $G_{fbll}(s)$  的定义及图 B3 的推导过程见附录 B。

由图 B3 可知，内环闭环传递函数为：

$$G_c(s) = G_{Pl,cc}(s)[I + G_{Pl,cc}(s)Y_{fg} - G_{fr}(s)Y_{fg}Z_g]^{-1}Y_{fg} \quad (8)$$

其中， $Y_{fg}$  为滤波导纳与网络导纳矩阵。考虑锁相环与电压前馈的开环传递函数为：

$$G(s) = -sL_g G_{cpil}(s)G_c(1,1)[I_{d0} + (1 - G_{fr}(s))\frac{U_{pd0}}{G_{Pl,cc}(s)}] \quad (9)$$

根据式(9)得出的 Nyquist 图可表现锁相环与内环交互作用对系统稳定性的影响，当锁相环带宽固定，通过 Nyquist 图可得出  $k_{ipmin}$ 。因此，结合图 B1 中的曲线和  $k_{ipmin}$  可得出基于过电压限值与小干扰稳定性约束的内环最优参数。

#### 3.3 综合应用方案

本文提出的参数优化方案通过调整设备等效阻抗改变了设备输出电流，该过程可能产生过电流，而超量的过电流会造成变流阀损坏，因此除稳定性问题以外，控制优化方案还需要考虑设备暂态过电流耐受能力。根据 VSC 电流限值  $I_{max}$  定义设备的暂态过流容量如下：

$$S_v = \frac{\sqrt{I_{dm}^2 + I_q^2}}{I_{max}} \quad (10)$$

该指标说明在给定的故障条件下，为满足过电压约束设备所需的最低过流容量，可用于设备运行出力指导。故障位置与电网强度都对暂态过流容量有影响，并且在相同的系统短路比条件下，给定的

过电压限值越低, 所需要的 $|I_{gdm}|$ 越大, 设备所需的暂态过流量越大。

依据上述约束形成的暂态过电压抑制方案应用流程如图 B4 所示。首先, 获取系统电气和控制参数, 包括线路阻抗和内环、锁相环与外环参数; 其次, 基于过电压约束与小干扰稳定性约束获取最优参数并计算暂态过流量 $S_v$ ; 最后, 根据设备最大过流量 $S_{vmax}$ 与 $S_v$ 的比较结果选择最优参数的应用方案并对系统进行稳定性校核。其中故障期间最优参数切换流程如下: 当设备检测到故障发生时, 将控制参数切换为优化参数。当设备检测到故障恢复后, 滞后 20ms 后将参数恢复为常规参数, 以防止低穿撤回和参数切换同时进行而可能造成的电气量波动。

#### 4 仿真验证

为了验证本文参数设计流程的合理性与有效性, 接下来使用电磁暂态仿真软件 PSCAD 搭建 VSC 并网系统的仿真模型, 电路拓扑如图 1 所示, 具体参数如表 C1 所示, 其中电感为标么值。设系统 1.0 s 发生三相金属接地故障, 故障持续时间为 0.5 s, 低穿撤回延时 30 ms。表 C1 中的 $k_{ip}$ ,  $k_{ii}$ 与 $T_{fr}$ 为传统内环设计方案得出的经典参数, 故障发生前与故障恢复后的稳态阶段设备均采用该组参数。过电压限值 $V_l$ 设定为 1.3 p.u.。由于模型线路为双回线, 因此等效短路比约等于 1.5。

当短路比为 1.5 时, 利用式(6)可计算 $I_{gdm}$ 为 -1.11 p.u., 此时最严重故障下所需暂态过流量 $S_v = 1.36p.u.$ , 说明设备应至少具备 1.36 倍过流能力或应运行在 1/1.36 p.u.的功率水平以下。

##### 4.1 等效阻抗模型验证

附录 A 给出了基于暂态阻抗模型的暂态过电压估算方法, 据此可获取故障恢复后 PCC 电压波形如图 4(a)所示, 其中虚线表示 1.3p.u.,  $U_p$  为标么值。

同时, 图 4(b)为两机系统下设备输出电流波形, 其中输出电流为标么值。在两机系统中, 两个跟网型 VSC 并联在 PCC 点, 其中 VSC<sub>1</sub>采用传统内环参数, VSC<sub>2</sub>采用优化内环参数, 通过比较 VSC<sub>1</sub>与 VSC<sub>2</sub>输出电流可以看出控制参数对暂态等效阻抗的影响。分析图 4(a)(b)可得出结论: 本文提出的 VSC 等效阻抗模型可描述设备控制参数与暂态期间阻抗外特性之间的关系, 并且从 VSC<sub>1</sub>未出现过电流而 VSC<sub>2</sub>出现了较为严重的过电流这一现象可知,

优化参数减小了设备暂态等效阻抗, 从而导致故障电流更多地分流到 VSC<sub>2</sub>, 符合前文分析。

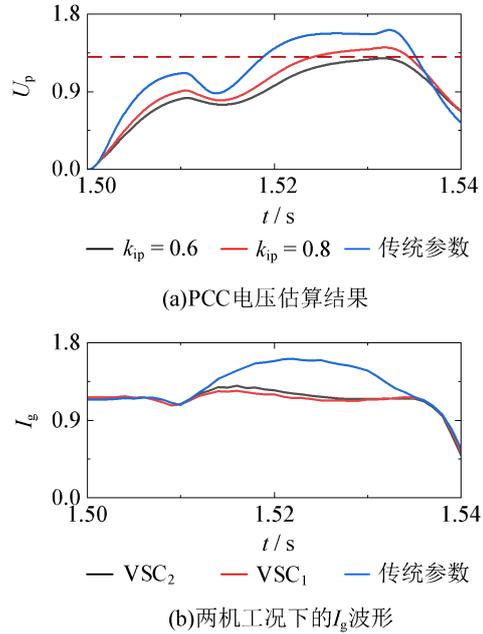


图 4 PCC 电压估算结果与 $I_g$ 波形

Fig.4 PCC Voltage Calculation Results and Waveform of

$I_g$

#### 4.2 过电压抑制应用方案验证

##### 4.2.1 优化参数获取

图 5 为不同 $k_{ip}$ 下式(9)的 Nyquist 图。由图可知 $k_{ip}$ 越小, 幅值裕度越小, 锁相环与内环动态交程度越大, 因此参数边界 $k_{ipmin} = 0.6$ , 结合图 B1 曲线可得 $T_{ffmax} = 0.025s$ 。 $k_{ipmin}$ 与 $T_{ffmax}$ 即该工况下的最优参数。

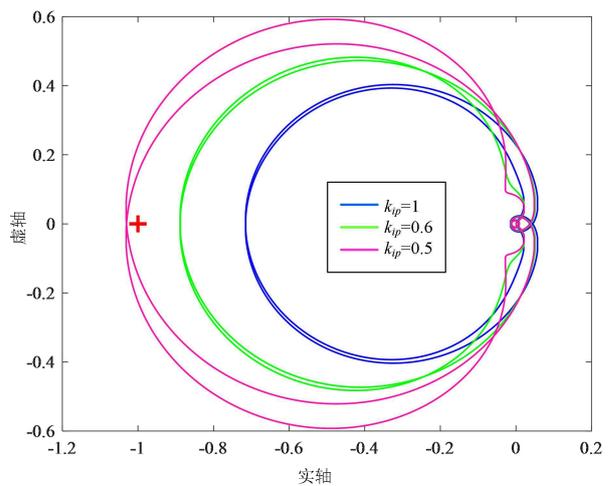


图 5 内环 Nyquist 图

Fig.5 Nyquist Plot of the Current Controller

##### 4.2.2 优化参数对过电压抑制效果验证

为验证不同控制参数对过电压的影响, 选取多组参数观察 $U_p$ 波形变化, 如图 6 所示, 其中 $U_p$ 为

标么值, 虚线表示 1.3p.u.。图 6(a)表明在  $T_{ff}$  保持不变时,  $U_p$  随着  $k_{ip}$  减小而减小; 图 6(b)表明在  $k_{ip}$  保持不变时,  $U_p$  随着  $T_{ff}$  增大而减小。图 6(a)(b)共同表明, 合理区间内单独改变  $k_{ip}$  或  $T_{ff}$  均难以满足过电压抑制需求, 当设备选取最优参数时 PCC 过电压最小, 与前文理论分析结果一致。

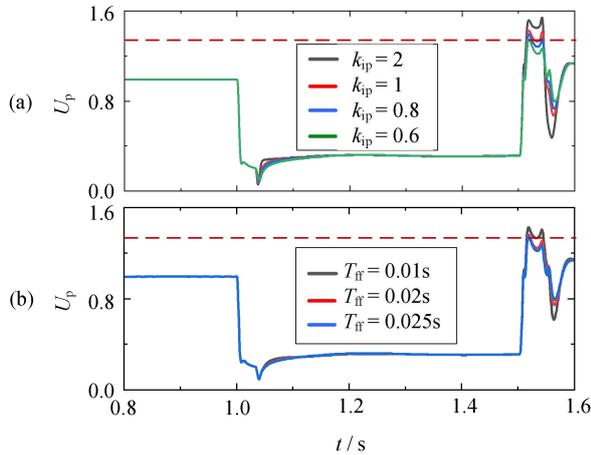


图 6 PCC 电压随参数变化特性

Fig.6 PCC Voltage Varies with Parameters

#### 4.2.3 优化参数对过电流影响效果验证

表 C2 为单机工况下设备在不同参数下暂态电流幅值的标么值。由表 C2 可知, 当  $T_{ff}$  固定时, 设备暂态电流幅值随着  $k_{ip}$  减小而增大; 当  $k_{ip}$  固定时, 设备暂态电流幅值随着  $T_{ff}$  增大而增大, 变化趋势与图 B1 描述一致。当设备选取最优参数时, 设备暂态电流幅值为 1.44 p.u., 暂态过流容量  $S_v$  为 1.20 p.u., 小于基于式(10)的计算值 1.36 p.u., 因此设计方案满足保守性原则, 不会出现超量的过电流问题。

#### 4.2.4 稳定性校核

在图 1 所示的拓扑以及表 C1 所示的参数下, 系统闭环特征根随  $k_{ip}$  的变化趋势如图 7 所示, 箭头指向表示  $k_{ip}$  减小。因此, 在锁相环带宽不变的情况下, 系统稳定裕度随  $k_{ip}$  的减小而减小。同时图 7 也说明了过电压抑制方案得出的最优控制参数符合小干扰稳定要求。

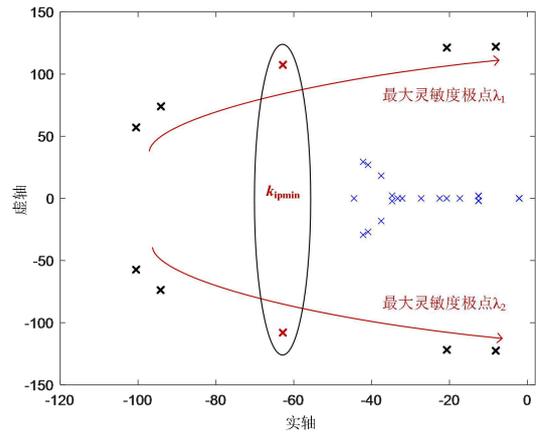


图 7 特征根随控制参数变化图

Fig.7 Eigenvalues Locus with the Change of Parameters

#### 4.3 切换延时对过电压的影响

本文提出的改进方案在低穿撤回后设置 20ms 的参数切换延时, 目的是防止内环参数切换与外环控制策略改变同时发生造成的电压波动。图 8 说明了切换延时  $T_d$  对过电压的影响过程, 其中  $U_p$  为标么值。可以看出, 20ms 的延时足以抵消参数切换动态对过电压的助增作用。

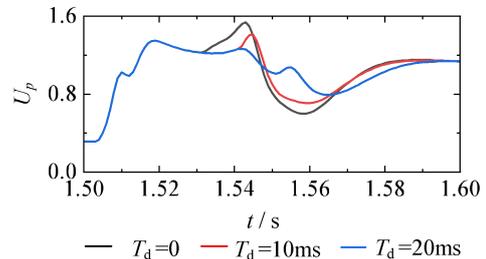


图 8 PCC 电压随切换延时变化特性

Fig.8 PCC Voltage Varies with Switching Delay

### 5 结论

本文针对新能源机组电磁暂态时间尺度暂态过电压问题, 提出了 VSC 内环控制参数优化策略, 并依托 PSCAD 验证了优化参数对抑制机组暂态过电压的有效性, 得到以下几点结论:

1) 以内环是否完全响应为标准将故障恢复暂态分为两个阶段, 建立了暂态多过程等效模型, 从阻抗角度揭示了暂态过电压的产生机理: 设备等效阻抗越大, 其所能为扰动能量提供的耗散通路越小, 从而导致能量流入电网产生过电压。

2) 基于阻抗模型探讨了 VSC 内环控制参数对暂态过电压的影响机制并提出了参数优化方案: 减小  $k_{ip}$ 、增大  $T_{ff}$  可有效减小 VSC 等效阻抗, 从而为

故障恢复的扰动能量提供更大的耗散通路,实现过电压抑制目标。

3)结合 VSC 过流容量和小干扰同步稳定约束提出了暂态过电压抑制方法与应用流程,增强了系统电压支撑能力。

#### 参考文献:

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.  
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474(in Chinese).
- [2] 马静,沈雅琦,杜延菱,等. 适应宽频振荡的风电并网系统主动阻尼技术综述[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1673-1686.  
MA Jing, SHEN Yaqi, DU Yanling, et al. Overview on active damping technology of wind power integrated system adapting to broadband oscillation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1673-1686(in Chinese).
- [3] 邢纪奎,袁辉,代江,等.抑制新能源次/超同步振荡的SVG鲁棒自适应控制参数设计方法[J].电力自动化设备,2024,44(8):160-167.  
XING Jikui, YUAN Hui, DAI Jiang, et al. Design method of robust adaptive control parameter of SVG to suppress sub/sup-synchronous oscillation caused by new energy.[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024,44(8):160-167.
- [4] 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.  
SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on Serious Wind Turbine Generators Tripping Accident in Northwest China Power Grid in 2011 and Its Lessons[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.(in Chinese).
- [5] 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.  
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on Cascading Tripping Risk of Wind Turbines Caused by Transient Overvoltage and Its Countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.(in Chinese).
- [6] Ekic, A.; Wu, D.; Jiang, J.N. Impact of Solar Inverter Dynamics during Grid Restoration Period on Protection Schemes Based on Negative-Sequence Components[J].Energies, 2022, 15, 4360.
- [7] 孙华东,徐式蕴,贺静波,等.高比例电力电子电力系统过电压(一):定义、分类及相关要求[J].中国电机工程学报,2024,44(1):22-34.  
SUN Huadong, XU Shiyun, HE Jingbo, et al. Overvoltage of the power system integrated with high proportion of power electronics (I) : definition, classification and relevant requirements[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 22-33(in Chinese).
- [8] L. Fan, Z. Miao and M. Zhang, Subcycle Overvoltage Dynamics in Solar PVs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(3): 1847-1858.
- [9] 刘其辉,闫佳颖,吴勇,等.计及锁相误差的双馈风电并网系统暂态过电压特性与抑制[J].电力系统自动化,2023,47(11):165-173.  
LIU Qihui, YAN Jiaying, WU Yong, et al. Automation of Electric Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11):165-173.
- [10] 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(9):3224-3239.  
DU Weizhu, LUO Yazhou, LI Yunhong, et al. Reviews of Transient Overvoltage Problem Cause by Extra Reactive Power in Large Scale Wind Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3224-3239.
- [11] 贾科,刘浅,杨彬,等.计及锁相环动态特性的逆变电源故障暂态电流解析[J].电网技术,2021,45(11):4242-4251.  
JIA Ke, LIU Qian, YANG Bin, et al. Transient Fault Current Analysis of the Inverter-interfaced Renewable Energy Sources Considering the Dynamic Characteristics of the Phase-locked Loop[J]. Power System Technology, 2021,45(11):4242-4251.
- [12] Xin Huanhai, Liu Xinyu, Zheng Di, et al, Risk Assessment of Post-Fault Temporary Overvoltage Using Generalized Short-Circuit Ratio, IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1837-1849.
- [13] 赵博元,路晨,陈磊,等.锁相环动态对切换延迟导致的VSC暂态过电压的影响[J/OL]. 电网技术:1-11[2024-05-06].https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0448.
- [14] 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(2):526-533.  
JIA Junchuan, JIN Yiding, ZHAO Bing, et al. Impact Analysis and Performance Optimization of LVRT Control of Wind Turbine on Transient Overvoltage of Power System[J]. Power System Technology, 2021,45(2):526-533.
- [15] 林伟芳,任晓钰,张桂红,等.考虑角稳定暂态过电压的新能源电压穿越控制参数优化[J].电网技术,2023,47(4):1323-1331.  
LIN Weifang, REN Xiaoyu, ZHANG Guihong, et al. Optimization of Voltage Ride-through Control Parameters of Renewable Energy Considering Power Angle Stability and Transient Overvoltage[J]. Power System Technology, 2023,47(4):1323-1331.
- [16] 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.  
WANG Xichun, REN Xiaofang, ZHANG Guihong, et al. Influence of Wind Turbine Fault Ride-through Characteristics on Transient Overvoltage of Large-scale Wind Power DC Transmission Systems and Parameter Optimization[J]. Power System Technology, 2021,45(12):4612-4621.
- [17] 李光辉,王伟胜,何国庆,等.风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(三):送端风电机组暂态过电压抑制措施[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5079-5089.  
LI Guanghui, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Commutation Failure of UHVDC System for Wind Farm Integration (Part III):Transient Overvoltage Suppression Measures of Wind Powers in Sending Terminal Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022,42(14):5079-5089.
- [18] 张芳,王赫,李传栋.含静止无功发生器的直驱风电并网系统稳定性分析及振荡抑制策略[J].电力自动化设备,2024,44(6):1-8+17.  
ZHANG Fang, WANG He, LI Chuandong. Stability analysis and oscillation suppression strategy of direct-drive wind power grid-connected system with static var generator. Automation of Electric Power Systems, 2024,44(6):1-8+17.
- [19] 刘星琪,邹志翔,姚屹洋,等.基于锁相环与电流环解耦的并网变换器稳定性控制策略[J].电力系统自动化,2024,48(19):109-119.  
LIU Xingqi, ZOU Zhixiang, YAO Yiyang, et al. Stability Control strategy for grid-connected converter based on decoupling of phase-locked loop and current loop[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2024, 48(19):109-119.

[20] H. Gong, X. Wang and L. Harnefors, Rethinking Current Controller Design for PLL-Synchronized VSCs in Weak Grids[J], IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1369-1381.

[21] R. Mahmud, D. Narang and A. Hoke, Reduced-Order Parameterized Short-Circuit Current Model of Inverter-Interfaced Distributed Generators[J], IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3671-3680.

[22] 周诗颖,邹旭东,童力,等.考虑锁相环影响的LCL型并网变换器电流环控制器参数设计[J].中国电机工程学报,2016,36(4):1075-1089.

ZHOU Shiyong, ZHOU Xudong, TONG Li, et al. Design of LCL-type Grid-connected Converter Current Loop Controller

Parameters Considering Effects of Phase Locked Loops[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(4):1075-1089.

作者简介:

尚若愚(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统暂态电压安全问题。(E-mail: 22260124@zju.edu.cn);

辛焕海(1981—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向为高比例新能源电力系统稳定性分析和控制。(E-mail: xinh@zju.edu.cn)。

## Transient Overvoltage Suppression Method of Grid-Following Converter Based on Equivalent Impedance Optimization

SHANG Ruoyu<sup>1</sup>, XIE Huan<sup>2</sup>, LIU Xinyu<sup>3</sup>, LI Changyu<sup>2</sup>, XIE Luo Chen<sup>3</sup>, XIN Huanhai<sup>1,3</sup>

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The large-scale access of renewable energy sources (RESs) to the power grid aggravates the transient overvoltage problem during the fault recovery period. Aiming at the overvoltage on electromagnetic transient time scale, an equivalent transient multi-process model of grid-following converter is established. Based on the proposed model, the mechanism of transient overvoltage is revealed. Furthermore, by analyzing the influence of current loop control parameters on transient overvoltage, a parameter optimization scheme is proposed. On this basis, due to the improved parameters may aggravate the interaction between the phase-locked loop and the current loop, resulting in small disturbance synchronous instability, the parameter boundary is proposed according to the interaction dynamics of the two, then a transient overvoltage suppression process is formed based on the equivalent model considering the overcurrent capability of converter. Finally, the electromagnetic transient simulation results show that the proposed model can accurately reflect the transient overvoltage mechanism, and the proposed method can effectively suppress the transient overvoltage.

**Key words:** grid-following converters; equivalent model of current loop; small disturbance synchronous instability; transient overvoltage suppression; overcurrent capacity

### 附录 A

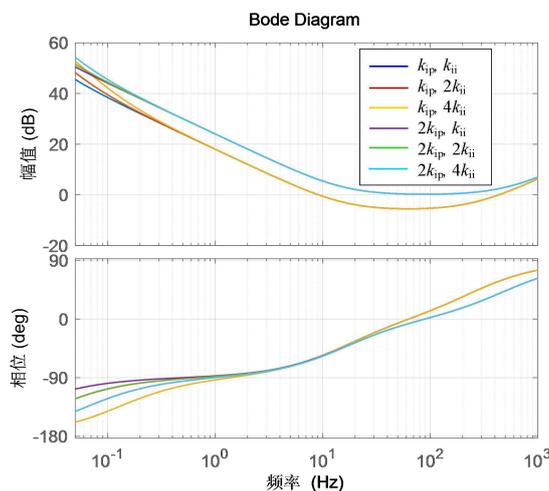


图 A1 等效阻抗伯德图

Fig.A1 Bode Plot of Equivalent Impedance

图 1 所示拓扑中阶段 I 电路节点电压方程表示如下：

$$(\mathbf{Y}_{\text{vsc}} + \mathbf{Y}_c + 2\mathbf{Z}_g^{-1})\mathbf{U}_{\text{pst}} = \frac{G_{\text{PI,cc}}(s)}{G_{\text{PI,cc}}(s) + sL_f} \frac{\mathbf{I}_{\text{xyref}}}{s} (e^{-\tau_1 s} - e^{-\tau_2 s}) + 2\mathbf{Z}_g^{-1} \frac{\mathbf{E}}{s} (1 - e^{-\tau_2 s}) + \mathbf{Y}_{\text{vsc}} L_f \mathbf{I}_f(0_-) + \mathbf{Z}_g^{-1} [L_{g2} \mathbf{I}_{g2}(0_-) - L_{g1} \mathbf{I}_{g1}(0_-) - L_g \mathbf{I}_g(0_-)] \quad (\text{A1})$$

其中， $\mathbf{Y}_c$  为滤波电容导纳， $\mathbf{Z}_g$  为线路阻抗， $\mathbf{I}_{\text{xyref}}$  为 xy 坐标轴下电流指令值， $\tau_1$ ， $\tau_2$  分别为内环动态衰减系数与控制延时。

阶段 I 电压计算式如下：

$$\mathbf{U}_{\text{pc}} = G_{\text{filt}}(s)(\mathbf{U}_{\text{pst1}} + \mathbf{U}_{\text{pst2}}) \quad (\text{A2})$$

其中， $G_{\text{filt}}(s)$  为测量滤波函数，形式为标准二阶低通滤波函数。 $\mathbf{U}_{\text{pst1}}$ ， $\mathbf{U}_{\text{pst2}}$  分别为零输入响应和零状态响应。

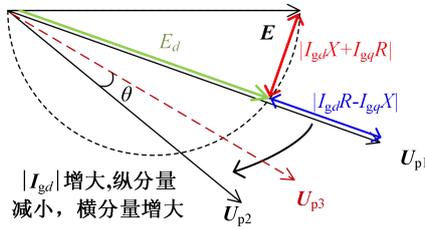


图 A2 同步坐标相量图

Fig.A2 Phasor Diagram in dq-axis Coordinate Reference

## 附录 B

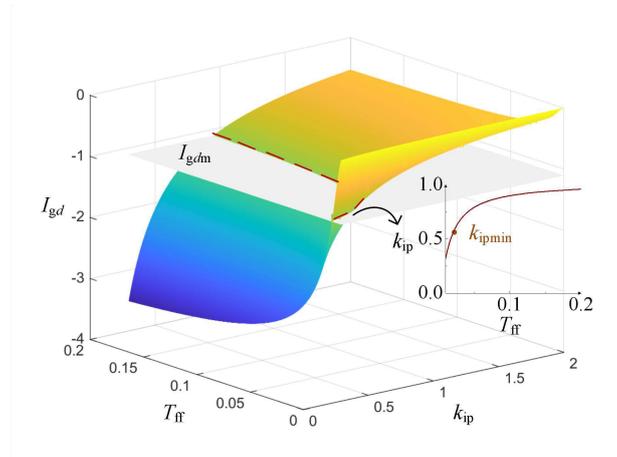


图 B1 有功电流与控制参数关系图

Fig.B1 Relationship Between  $I_{gd}$  and Control Parameters

锁相闭环传递函数为  $G_{\text{cpll}}(s)$ ，如式(B1)所示。

$$\begin{cases} G_{\text{pll}}(s) = k_{\text{ppll}} + \frac{k_{\text{ipll}}}{s} \\ G_{\text{cpll}}(s) = \frac{G_{\text{pll}}(s)}{s + U_{\text{pd}} G_{\text{pll}}(s)} \end{cases} \quad (\text{B1})$$

锁相环对 VSC 内电势、输出电流和 PCC 电压的影响可由以下矩阵表示：

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{pll} = \begin{bmatrix} 0 & -G_{cp11}(s)U_{cq0} \\ 0 & G_{cp11}(s)U_{cd0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} = G_{up11}(s) \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} \\ \mathbf{I}_{pll} = \begin{bmatrix} 0 & -G_{cp11}(s)I_{q0} \\ 0 & G_{cp11}(s)I_{d0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} = G_{ip11}(s) \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} \\ \mathbf{V}_{fp11} = \begin{bmatrix} 0 & -G_{cp11}(s)U_{pq0} \\ 0 & G_{cp11}(s)U_{pd0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} = G_{fp11}(s) \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (B2)$$

其中， $U_{pd0}$  和  $I_{dq0}$  分别为故障恢复后稳态 VSC 内电势和 VSC 输出电流。根据式(1),(B1)及(B2)可画出等效框图如下：

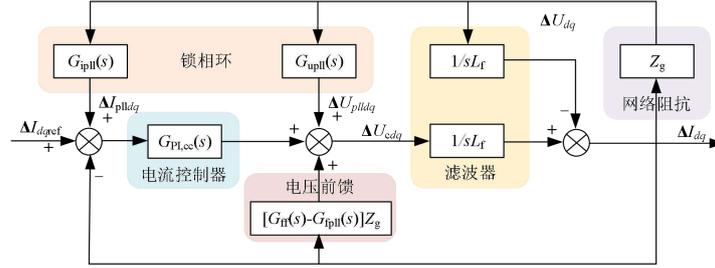


图 B2 VSC 并网等效框图

Fig. B2 Equivalent block diagram of VSC connected with the grid

进一步可化简如下：

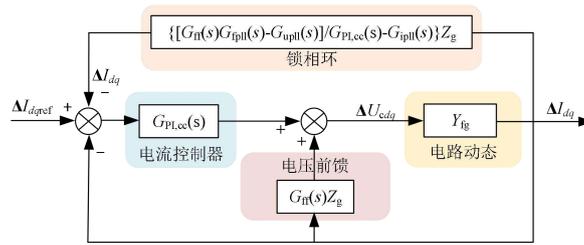


图 B3 考虑前馈环节的交互矩阵框图

Fig.B3 Equivalent Block Diagram of Interaction Matrix Considering VFF Control

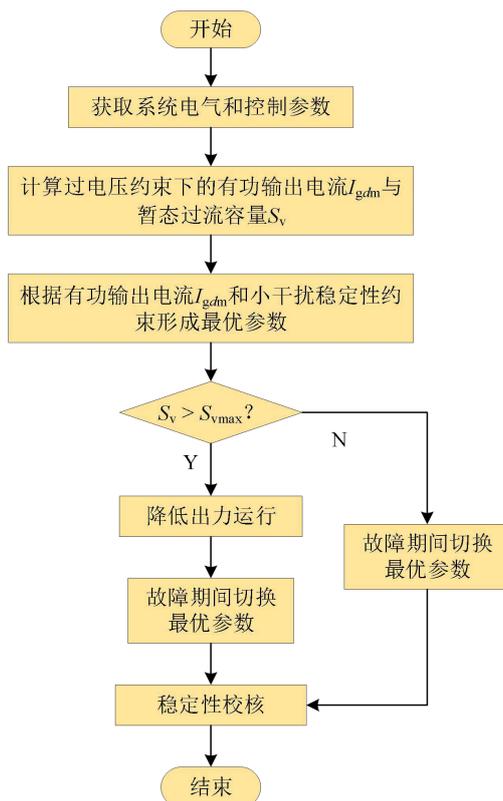


图 B4 暂态过电压抑制流程图

Fig.B4 Flow Chart of Transient Overvoltage Suppression Scheme

附录 C

表 C1 并网系统参数

Table C1 Parameters of the Experimental System

系统	参数	参数值
电网	基准频率 $f_0$	50 Hz
	线路阻抗 $L_g$	1.33 p.u.
	额定电压 $U_b$	230 kV
	阻感比	0.1
设备	锁相环带宽	30 Hz
	比例增益 $k_{ip}$	2
	前馈常数 $T_{ff}$	0.01 s
	滤波电感 $L_f$	0.1 p.u.
	积分增益 $k_{ii}$	0.1

表 C2 设备暂态电流幅值

Table C2 Amplitude of Transient Current

$k_{ip}$	电流幅值/p.u.		
	$T_{ff} = 0.01s$	$T_{ff} = 0.02s$	$T_{ff} = 0.025s$
2	1.26	1.29	1.30
1	1.31	1.36	1.38
0.6	1.34	1.41	1.44

录用证明

## 论文录用通知

尊敬的尚若愚，谢欢，刘昕宇，李长宇，谢锣辰，辛焕海：

您好！

您撰写的《基于等效阻抗优化的跟网型变流器暂态过电压抑制方法》（编号 epae20240723011）经专家审阅，本刊决定录用，拟在《电力自动化设备》（中国标准连续出版物号：ISSN 1006-6047；CN 32-1318/TM）刊载，特此告知。

感谢您的支持，欢迎再次来稿。

祝一切安好。



---

网址：<https://www.epae.cn/dlzdhsb/ch/index.aspx>

地址：南京市高新技术产业开发区星火路8号国电南自研究院《电力自动化设备》杂志社

邮编：210032 电话：025-83537347, 51859279 E-mail：[epae@sac-china.com](mailto:epae@sac-china.com)

## 浙江大学国内学术期刊分级目录指南·2020版

## 一、国内一级学术期刊（其中带\*号的为人文社科权威级期刊）：

序号	刊名	ISSN号
1	文艺研究*	0257-5876
2	心理学报*	0439-755X
3	考古学报*	0453-2902
4	历史研究*	0459-1909
5	文学评论*	0511-4683
6	经济研究*	0577-9154
7	中国语文*	0578-1949
8	哲学研究*	1000-0216
9	外语教学与研究*	1000-0429
10	政治学研究*	1000-3355
11	体育科学*	1000-677X
12	外国文学评论*	1001-6368
13	新华文摘*	1001-6651
14	中国图书馆学报*	1001-8867
15	中国社会科学*	1002-4921
16	管理世界*	1002-5502
17	教育研究*	1002-5731
18	社会学研究*	1002-5936
19	法学研究*	1002-896X
20	新闻与传播研究*	1005-2577
21	马克思主义研究*	1006-5199
22	天文学报	0001-5245
23	地质学报	0001-5717
24	地球物理学报	0001-5733
25	微生物学报	0001-6209
26	古生物学报	0001-6616
27	科学通报	0023-074X
28	海洋与湖沼	0029-814X
29	环境科学	0250-3301

序号	期刊名称	ISSN
682	中国医学计算机成像杂志	1006-5741
683	旅游科学	1006-575X
684	电力自动化设备	1006-6047
685	分析科学学报	1006-6144
686	中国糖尿病杂志	1006-6187
687	中国特色社会主义研究	1006-6470
688	特种油气藏	1006-6535
689	空间结构	1006-6578
690	地质力学学报	1006-6616
691	应用与环境生物学报	1006-687X
692	哈尔滨工程大学学报	1006-7043
693	工程爆破	1006-7051
694	Journal of Iron and Steel Research, International	1006-706X
695	中国骨质疏松杂志	1006-7108
696	Acta Metallurgica Sinica(English Letters)	1006-7191
697	听力学及言语疾病杂志	1006-7299
698	外国教育研究	1006-7469
699	高校地质学报	1006-7493
700	工程设计学报	1006-754X
701	水利水电科技进展	1006-7647
702	世界民族	1006-8287
703	燃烧科学与技术	1006-8740
704	气候与环境研究	1006-9585
705	中国康复理论与实践	1006-9771
706	中国疼痛医学杂志	1006-9852
707	中国电化教育	1006-9860
708	含能材料	1006-9941
709	Tsinghua Science and Technology	1007-0214
710	草地学报	1007-0435
711	国际经济评论	1007-0974
712	湖南农业大学学报·自然科学版	1007-1032
713	Wuhan University Journal of Natural Sciences	1007-1202
714	世界经济与政治论坛	1007-1369
715	道德与文明	1007-1539
716	当代亚太	1007-161X
717	史林	1007-1873
718	思想理论教育	1007-192X
719	塑性工程学报	1007-2012
720	河北经贸大学学报	1007-2101
721	开放教育研究	1007-2179
722	红外与激光工程	1007-2276
723	宇航材料工艺	1007-2330

论文已被该期刊录用，该期刊被检索或为一级期刊。

李俊海

《Ei Compendex》收录证明

经检索“Engineering Village”，下述论文被《Ei Compendex》收录。（检索时间：2024年12月30日）。

<RECORD 1>

Accession number:20244717381038

Title:Optimization Scheme of STATCOM Parameters for Temporary Overvoltage Suppression

Authors:Shang, Ruoyu (1); Li, Changyu (2); Lou, Yuntian (3); Lu, Wenqing (2); Xie, Huan (2); Liang, Beihua (2)

Author affiliation:(1) Zhejiang University, Polytechnic Institute, Hangzhou, China; (2) State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Grid Technology Center, Beijing, China; (3) Zhejiang University, College of Electrical Engineering, Hangzhou, China

Corresponding author:Shang, Ruoyu(22260124@zju.edu.cn)

Source title:Proceedings - 2024 4th Power System and Green Energy Conference, PSGEC 2024

Abbreviated source title:Proc. - Power Syst. Green Energy Conf., PSGEC

Part number:1 of 1

Issue title:Proceedings - 2024 4th Power System and Green Energy Conference, PSGEC 2024

Issue date:2024

Publication year:2024

Pages:952-956

Language:English

ISBN-13:9798350365573

Document type:Conference article (CA)

Conference name:4th Power System and Green Energy Conference, PSGEC 2024

Conference date:August 22, 2024 - August 24, 2024

Conference location:Shanghai, China

Conference code:203592

Sponsor:SnT; Spunto Consulting

Publisher:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

Number of references:16

Controlled terms:Delay control systems

Uncontrolled terms:Controller dynamics - Current controller - Current controller dynamic - Grid-following converter - Optimization scheme - Overvoltage suppression - Power - Power equipment - Reactive power compensator - Temporary overvoltages

Classification code:731.1 Control Systems

DOI:10.1109/PSGEC62376.2024.10721080

Funding details: Number: 52018K22001M, Acronym: -, Sponsor: -;

Funding text:This work is jointly supported by the Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power company limited (52018K22001M).

Database:Compendex

Compilation and indexing terms, Copyright 2024 Elsevier Inc.

注:

1. 以上检索结果来自 CALIS 查收查引系统。
2. 以上检索结果均得到委托人及被检索作者的确认。



# Optimization Scheme of STATCOM Parameters for Temporary Overvoltage Suppression

Ruoyu Shang  
Polytechnic Institute  
Zhejiang University  
Hangzhou, China  
22260124@zju.edu.cn

Changyu Li  
Grid Technology Center  
State Grid Jibei Electric Power  
Research Institute  
Beijing, China  
Lcy0609395@163.com

Yuntian Lou  
College of Electrical Engineering  
Zhejiang University  
Hangzhou, China  
12010048@zju.edu.cn

Wenqing Lu  
Grid Technology Center  
State Grid Jibei Electric Power  
Research Institute  
Beijing, China  
daqing1033@163.com

Huan Xie  
Grid Technology Center  
State Grid Jibei Electric Power  
Research Institute  
Beijing, China  
xie.huan@jibei.sgcc.com.cn

Beihua Liang  
Grid Technology Center  
State Grid Jibei Electric Power  
Research Institute  
Beijing, China  
Liang.beihua@jibei.sgcc.com.cn

**Abstract**—The temporary overvoltage (TOV) issue arises more frequently in modern power system as the access of electronic power equipment nowadays. One main reason is the reactive power surplus generated by reactive power compensators such as STATCOM. Due to the inherent delay of control and measurement in STATCOM, its reactive current output during the low-voltage ride through (LVRT) period cannot be withdrawn in time after fault clearance, resulting in surplus reactive power that raises the terminal voltage. To improve the voltage support capability of STATCOM, this paper first established the equivalent impedance model of STATCOM, then analyzed the influence of control parameters on TOV based on the dynamics of the current controller and filter. On this basis, the parameter range is determined according to the TOV and stability constraint, so as to form a parameter optimization scheme. The simulation results show that the proposed scheme can effectively suppress TOV.

**Keywords**—TOV, grid-following converter, STATCOM, current controller dynamics.

## I. INTRODUCTION

With the continuous development of long-distance transmission, the power loss in power system becomes an issue. To reduce power losses in transmission lines and minimize reactive power flow in power system, a large number of reactive power compensators are connected to the power grid separately of which the static synchronous compensator (STATCOM) has been widely used in both generator side and load side thanks to its good dynamic response performance [1-5], low power loss and low cost [6]. STATCOM based on grid-following (GFL) converter generates surplus reactive power due to control delay during fault recovery, resulting in temporary overvoltage (TOV) at the point of common coupling (PCC). Due to the weak TOV endurance of power electronic equipment, TOV may lead to equipment damage. Therefore, it is urgent to clarify the influence mechanism of STATCOM

control parameters on TOV and propose a corresponding suppression scheme.

In terms of control optimization for TOV suppression, there are two types of studies: adding additional devices to improve TOV endurance [7,8], or optimizing control strategies or parameters. The former brings higher economic cost, thus it is more economical and reliable to suppress TOV through control optimization, while there are still deficiencies in existing research. When it comes to the analysis method for the transient process, the voltage dynamic characteristic of GFL-converter under electromagnetic time scale is described in [9], then a dynamic calculation model is established, which helps clarify the influence of cascade control structure on system dynamics. The dynamics of phase-locked loop (PLL), current control loop and voltage feedforward (VFF) control are considered in [10], and then the influence of control parameters on the system stability is analyzed, which reveals the coupling relationship among the cascaded control structures. This paper aims to illustrate the mechanism of influence of control parameters, which is more intuitive to analyze with equipment equivalent impedance. However, there is a lack of analysis methods from the impedance perspective.

Based on the above analysis methods, several TOV suppression schemes are proposed. In [11], a suppression method for TOV by adjusting PLL parameters is proposed. However, it relies on multiple iterations of PLL deviation. It is reported in [12] that improving the fault ride through (FRT) parameters can help suppress TOV, while changing the parameters also affect the reactive power output during the fault. Moreover, it is proposed in [13] that a virtual impedance module can be used to suppress TOV, which can be achieved by adjusting the structure of the inner loop to change the transient characteristics of STATCOM. To sum up, the control optimization for TOV suppression is concentrated in three parts: FRT strategy, PLL and inner loop. However, the

This work is jointly supported by the Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power company limited (52018K22001M).

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10721080>