

国家关键基础设施电磁恢复力^{*}

谢彦召, 刘民周, 陈宇浩

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 瞬态电磁环境与应用国家级国际联合研究中心, 西安 710049)

摘 要: 随着国家关键基础设施建设规模和信息化水平的提升,其在高空电磁脉冲、有意电磁干扰和地磁暴等强电磁环境下的电磁安全逐渐受到了国内外的关注。强电磁环境属于小概率、高风险事件,其影响机理和评估方法与雷电、系统内过电压等常规电磁事件有较大不同,采用期望风险指标的常规可靠性分析方法难以有效评估管理强电磁环境相关风险。从电磁恢复力视角出发,提出了关键基础设施电磁安全的三棱锥模型,并重点以电网为例,探讨关键基础设施电磁恢复力的内涵和外延,并对开展电磁恢复力研究提出建议。

关键词: 关键基础设施; 高空电磁脉冲; 有意电磁干扰; 地磁暴; 电磁恢复力; 电磁安全

中图分类号: X934 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.190202

Electromagnetic resilience of critical national infrastructure

Xie Yanzhao, Liu Minzhou, Chen Yuhao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment,

National Center for International Research on Transient Electromagnetics and Applications,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the increase in the system scale and informatization level of the critical national infrastructures, the electromagnetic security in extreme electromagnetic environments such as the high-altitude electromagnetic pulse, the intentional electromagnetic interference and the geomagnetic storm has attracted more attention. Unlike conventional electromagnetic events such as the lightning and the overvoltage in power systems, extreme electromagnetic environments are small-probability but high-risk events whose impact mechanisms and evaluation methods are quite different. And the conventional reliability analysis, which adopts the expected value indexes, is difficult to effectively evaluate and manage the risks related to extreme electromagnetic environments. In this context, this paper presents a triangular pyramid model for the study of electromagnetic security of critical infrastructures. Then taking the power grid as an example, it discusses the implication and significance of electromagnetic resilience to critical infrastructures, and finally makes a proposal for the future study of electromagnetic resilience.

Key words: critical infrastructure; high-altitude electromagnetic pulse; intentional electromagnetic interference; geomagnetic disturbances; electromagnetic resilience; electromagnetic security

PACS: 41.20.Jb; 88.80.Kg

近年来,电网和油气管网等能源系统、通信系统和交通系统等国家关键基础设施的自动化、网络化、智能化水平不断提高,在提升其经济性和效率的同时,也带来了强电磁环境下的电磁安全问题。以高空电磁脉冲(High-altitude ElectroMagnetic Pulse, HEMP)、有意电磁干扰(Intentional ElectroMagnetic Interference, IEMI)和极端地磁扰动(GeoMagnetic Disturbances, GMD)等为代表的强电磁环境,可能会对电力系统等国家关键基础设施的安全可靠运行带来重大挑战,受到了国内外的广泛关注。

美国国会分别于 2001 年、2006 年、2016 年和 2018 年根据国防授权法案四次成立电磁脉冲委员会,评估电磁脉冲攻击对美国关键基础设施的威胁^[1-3]。2010 年,北美电力可靠性协会发布了《高影响、低频率事件对北美大电网的风险》报告,HEMP, IEMI 和 GMD 均被列为可能对电网造成重大影响的灾难性事件^[4]。2016 年 7 月,美国能源部和美国电力科学研究院合作发布了《电磁脉冲恢复力联合战略》,用以指导美国政府和电力行业

^{*} 收稿日期:2019-05-24; 修订日期:2019-06-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2016 YFC 0800100)

作者简介:谢彦召(1973—),男,博士,教授,从事高功率电磁环境与电磁脉冲研究;yzxie@mail.xjtu.edu.cn。

提高应对强电磁脉冲威胁的电网恢复力^[5],其后美国能源部和美国电力科学研究院分别推出了各自的行动计划^[6-7]。2019年3月,美国总统特朗普签署行政命令,指示联邦机构审查电磁脉冲对基础设施的威胁^[8]。欧盟“第七框架计划”(2007年至2013年)在安全主题中支持了 HIPOW, SECRET 和 STRUCTURE 三个研究项目,分别研究高功率微波威胁下的关键基础设施防护、电磁攻击下的铁路安全、IEMI 攻击下关键基础设施的恢复力提升策略^[9-11]。近年来,我国也逐渐重视国家关键基础设施的电磁安全研究,西安交通大学联合国家电网、中石油和中广核等单位开展了电力设备、油气管道数据采集与监视控制(SCADA)系统和核电站最小安全系统等的 HEMP 效应试验和易损性分析研究^[12-14]。2018年7月,国家能源局发布《电力行业应急能力建设行动计划(2018-2020年)》,强调提高电力突发事件应对能力^[15]。

鉴于强电磁威胁事件极小概率的特征和民用基础设施的特点,应以电磁恢复力(Electromagnetic Resilience)的综合提升作为强电磁威胁的应对策略,即通过预警预防、防护加固和快速恢复等多种手段来降低强电磁环境对关键基础设施的影响。本文将重点以电网为例,基于易损性分析评估和应急防护能力提升的需求,讨论国家关键基础设施电磁恢复力的一些概念内涵和外延,并对开展国家关键基础设施电磁恢复力研究提出建议。

1 强电磁环境威胁的类别

本文主要关注高空电磁脉冲、有意电磁干扰和极端地磁扰动等瞬态电磁环境,其主要参数特征简述如下。

HEMP 是由高空核爆产生的强大电磁干扰源,具有地域覆盖范围广、场强幅值高、频谱覆盖范围宽等特点,其影响可能是战略性、全局性的^[16]。HEMP 包括 E1, E2 和 E3 三个成分,IEC61000-2-9 标准给出的典型波形如图 1 所示^[17]。其中, E1 成分场强幅值高、前沿快、频谱宽,可以通过天线、孔缝、线缆等强耦合作用,对各种电气电子设备造成暂时或永久损伤; E2 成分在时域和频域特征上类似雷电,场强幅值小,但作用范围更广; E3 成分会在电网中产生地磁感应电流,影响大量变压器的运行状态。HEMP 三种成分依次作用下,高空电磁脉冲可能同时影响破坏大量的电网一次和二次设备,影响电网的安全可靠运行。

IEMI 通常是指利用人为有意产生的电磁瞬态来干扰甚至毁伤电气电子系统^[18]。IEMI 源在频率范围上包括窄带、宽带和超宽带等,不断发展的高功率微波属于 IEMI 的典型,可以通过辐射和传导等途径耦合到电气电子系统中引起不同等级的效应,其作用范围远不如 HEMP 和 GMD,影响一般是设备级、局部的,但作用效果显著。另一方面,随着信息技术和微电子技术的发展,现代电气电子系统对于带内强电磁干扰可能更为敏感,国际社会担心如不采取防护应对措施,会诱发 IEMI 干扰源的使用。

GMD 是指由太阳活动所引发的地磁场剧烈扰动,时变磁场会在地表感应出电场,进而在电网输电线路、中性点接地变压器和大地构成的回路中产生地磁感应电流(GIC)^[19-21]。GIC 的频率成分一般为 0.1 mHz~0.1 Hz,这种准直流电流流入变压器后在磁路中产生偏置磁通,使得变压器铁芯产生半波饱和,励磁电流急剧增大且波形严重畸变。一方面对变压器本身造成温升、振动、噪声增加等诸多不利影响;另一方面造成的无功损耗集群增加和大量谐波的产生,可能进一步引起电压跌落、继电保护误动等可能影响整个电网安全运行的事故。传统观点认为地磁暴通常仅影响高纬度地区,但近年来的研究发现大地电性结构、电网特性等因素也会影响 GIC 的大小,类似我国的中低纬度国家同样可能出现高幅值的 GIC^[22]。

上述三类强电磁环境的特性和影响对比如表 1 所示。在产生机理方面, HEMP 和 IEMI 是人为有意产生,而 GMD 则源于空间天气变化,因此在威胁场景建模和风险评估方法上有较大差别。在作用范围方面, HEMP 和地磁暴覆盖范围广,需要进行设备级-发电厂/变电站级-系统级的风险评估,相比之下 IEMI 侧重于对设备级和发电厂/变电站级的影响分析。

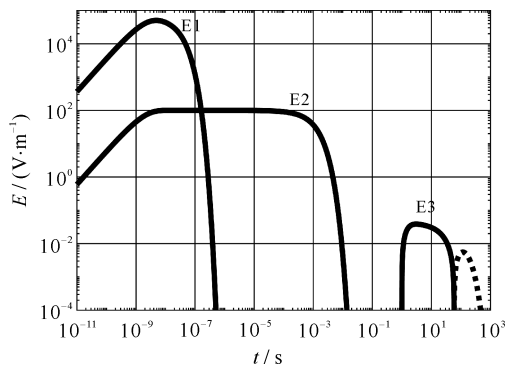


Fig. 1 HEMP environment (IEC61000-2-9)

图 1 HEMP 环境(IEC61000-2-9)

表 1 典型强电磁环境的特性对比

Table 1 Comparison of characteristics of typical extreme electromagnetic environment

EM threat	main frequency range	amplitude	main vulnerable equipment in power grids and its effect phenomena	radius of influence
HEMP	0.1~100 MHz(E1)	50 kV/m(E1)	disturbance or damage to the generator control system,	hundreds of kilometers~ thousands of kilometers
	100 kHz below(E2)	10~100 V/m(E2)	insulation problems at the winding ends of transformers & reactors,	
	0.1 mHz ~1 Hz(E3)	30~85 V/km(E3)	DC biasing of high voltage transformers, fault of SCADA system in power grid, incorrect operation of relay protection, flashover of distribution insulators and failure of distribution transformers, etc.	
IEMI	300MHz~tens of GHz	dozens of kV/m~ hundreds of kV/m	failure of secondary equipment such as power grid SCADA and relay protection system	several meters~ tens of kilometers
GMD	0.1 mHz~0.1 Hz	1~10 V/km	DC biasing of high voltage transformers	hundreds of kilometers~ thousands of kilometers

2 国家关键基础设施电磁恢复力研究的一些特点

2.1 强电磁环境作用范围广、后果严重,具有典型的小概率、高风险特征

HEMP 具有覆盖范围广、覆盖频谱宽、峰值场强高等特点,影响范围的广泛性和敏感对象的广泛性,可能对基础设施造成全局性、战略性影响。极端地磁暴的影响范围也可达数千 km,所引发的大量变压器直流偏磁会形成集群效应。上述强电磁环境可能引发广域基础设施的多重级联故障^[23],其后果的严重程度往往超出基础设施常规安全运行和防护应对的能力范围。

与基础设施的雷电防护、电力系统内开关操作过电压等问题不同的是,HEMP,IEMI,GMD 等属于小概率、高风险事件,在基础设施的规划运行和防护方面尚未予以充分考虑。

2.2 效应现象的多等级性和可恢复性

强电磁环境对国家关键基础设施的设备和系统影响属于非常规小概率事件,关注的效应等级要高于常规电磁兼容领域的敏感度(Susceptibility)和抗扰度(Immunity),一般用电磁易损性分析(Vulnerability)^[24-25]。三者的相互关系可以用图 2 来概念化表征。

在系统层面,以电力系统为例分析,受到扰动后的系统级响应按严重程度可分为若干类型(图 3):(1)常规电磁兼容问题引起电网受到扰动,但仍处于安全运行区间;(2)电网遭遇雷电等扰动后,通过继电保护措施等短时中断后,可以恢复正常运行;(3)HEMP,GMD,IEMI 等强电磁威胁事件发生,继电保护等设备故障,引起无功、谐波增加导致电网运行多重级联故障,更严重的还会造成系统无法恢复到初始状态,需降级运行,其恢复时间可能需要数小时/天/周;(4)HEMP,GMD 等强电磁威胁事件发生,未充分保护的大型变压器、发电机等关键设备受损,电网发生解列甚至崩溃,长期无法正常工作,其修复时间需要数月甚至数年。在电力系统常规规

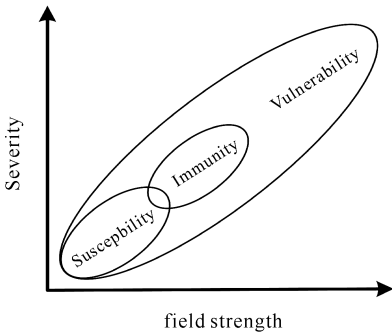


Fig. 2 Concepts related to the impact of the electromagnetic environment on the equipment
图 2 电磁环境对设备级影响的相关概念

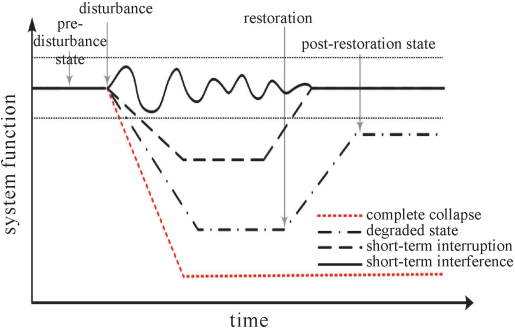


Fig. 3 Types of system response under electromagnetic disturbance
图 3 电磁事件作用下系统响应类型

划运行分析中主要针对前两种情况,本文要考虑的电磁恢复力或者电磁安全领域则重点针对后两种情况。

2.3 应采用适用于小概率、高风险事件的电磁易损性评估方法

这里首先要区分可靠性(Reliability)、安全(Safety)和安全(Security)三个概念及其相互关系。在系统层面的风险管理中,Reliability 分析方法旨在保障正常条件下电网的安全可靠运行,在电力系统运行中广泛采用的 N-1 准则等主要针对预想事故集合等低阶故障情况。针对更为严重的场景,Safety 概念通常指对设备或系统可能造成危害的情况及其预防措施,一般来自系统内部且较为严重,或虽来自外界但较为常见,已经有一定应对措施。而 Security 概念更强调针对蓄意或极端的外部威胁造成的危害及其应对措施,相应地,在关键基础设施电磁安全(Electromagnetic Security)研究中,在风险评估和防护方面需要充分考虑到强电磁环境的高影响、小概率性质。从美国等的实践上来看,电力企业一般会多关注 Reliability 和 Safety 层面,国会和政府多关注 Security 层面。

多种风险评估管理方法在基础设施电磁安全问题中得到了应用。其中概率风险评估方法通常最为常用,比如将电磁风险定义为威胁概率、系统易损性和系统重要性的乘积^[26-27],从这三个维度来度量基础设施面临的电磁风险。但由于强电磁威胁事件的特性,概率风险评估方法通常面临一些问题:不能将强电磁威胁等高影响、小概率事件与常规的低影响、高概率事件进行有效区分;IEMI 等人为攻击位置和发生概率等会受到攻击者主观因素影响,历史数据量较少且借鉴价值不大;人为攻击事件的发生概率和易损性存在高度的相关性,电磁易损性较高的系统有可能诱使对手以更高的概率采取攻击,从而抬升系统整体风险。为处理上述问题,基于系统的风险评估方法也被应用于电磁安全分析^[28-29],该方法更侧重于系统关键功能安全分析(Functional Safety),而非威胁事件的发生概率,即首先确定系统关键功能以及保障该功能的关键设备和系统,再进一步分析该功能的潜在的失效机理和减缓措施,以此筛选出威胁场景列表。

2.4 应对策略上更重视考虑关键节点防护加固的电磁恢复力提升

鉴于强电磁威胁事件极小概率的特征和民用基础设施的特点,从必要性和经济性考虑不应采取类似军事装备的全面电磁加固防护措施。另外电网、油气管网、高铁网及电信网等一般是广域分布式基础设施,从防护和应对措施上也有自身特殊性。因此综合起来,应以电磁恢复力的综合提升作为强电磁威胁的应对策略。

恢复力通常是指系统对极端事件的预防、抵御、吸收以及快速恢复的能力^[30-31],可对强电磁威胁事件发生前、中、后各阶段对系统的影响和系统的性能进行分析表征,应对措施也围绕着三个阶段来展开。就电力系统的电磁恢复力而言,实现三个阶段应对策略上的配合统一:在强电磁威胁事件发生前,基于预警监测判别电磁威胁源位置、强度和时空特性等,提前采取措施降低威胁影响;在强电磁威胁事件过程中,对关键设备和薄弱环节采取加固措施,并配合电网内部的已有保护手段,充分地减缓和吸收带来的冲击和影响;在强电磁威胁事件后,重点则是采取有效的黑启动、备用设备等措施和步骤,将关键负荷和主干网络尽快恢复到工作状态。电网等关键基础设施电磁恢复力提升的一个关键就是在预警预防、加固防护和快速恢复等方面优化资源分配,实现最优成本的最大化效果。

3 国家关键基础设施电磁恢复力的研究进展和建议

3.1 国家关键基础设施电磁安全三棱锥模型

针对基础设施面临的强电磁环境威胁,本文提出了关键基础设施电磁安全分析三棱锥模型,如图 4 所示。图中,三棱锥的三个侧面分别是电磁威胁(EM Threats)、关键基础设施(Critical Infrastructure)和二者之间的相互作用(Interaction),代表强电磁环境作用下关键基础设施的评估和防护的三个关键要素,电磁威胁和关键基础设施这两个面是源与作用对象,需要对二者的特性及其相互作用进行建模分析。三棱锥的顶点为恢复力(Resilience),是基础设施电磁安全研究的目标,三个棱边分别表示预警预防、防护加固和快速恢复三个方面,共同统筹应对来实现恢复力提升。而三棱锥底面的电磁易损性(Vulnerability)是整个基础设施电磁安全研究的基础。抓住关键基础设施电磁安全三棱锥模型的这几个关键要素,就比较容易理清楚开展工作的重要方面。

基础设施电磁安全研究,需要考虑易损性、重要性和经济性三个维度(图 5)。重要性是前提,易损性是基础,经济型是要求。在研究易损性物理特性同时,也要充分考虑基础设施的工程属性。鉴于基础设施敏感效应对象的广泛性,保护系统中的所有元件是不切实际的。因此需要提炼出系统关键功能,识别对系统运行至关重要并且易受强电磁环境损害的设备及系统的子集进行重点防护,实现具有高效费比的综合防护策略。

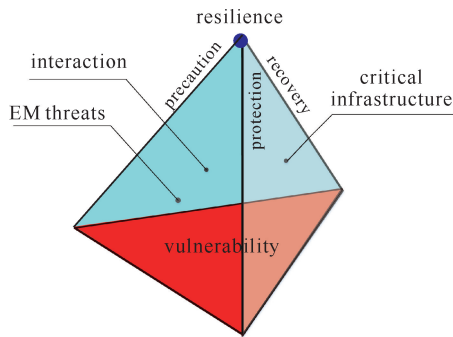


Fig. 4 Triangular pyramid model for the electromagnetic security of critical infrastructures

图 4 关键基础设施电磁安全三棱锥模型

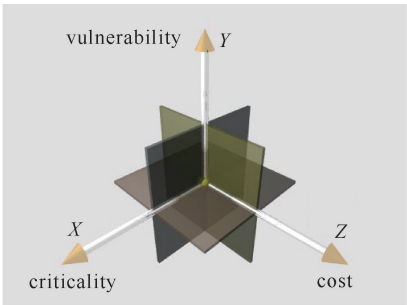


Fig. 5 Three dimensions of infrastructure electromagnetic security construction

图 5 基础设施电磁安全建设的三个维度

3.2 强电磁威胁事件的环境与场景建模

对于强电磁环境威胁事件,需要建模表征其幅值、时间变化和空间分布等特征。通过构建强电磁威胁事件的不确定性场景或概率场景,为系统风险评估和工程防护提供指导。

HEMP 和地磁暴的形成涉及多个复杂的物理过程,其中存在着大量的不确定因素。例如,地磁暴的产生涉及空间物理和地球物理中一系列复杂过程,目前通常采用极值理论建立磁暴感应地电场概率模型,基于地磁场监测数据统计分析和大地电性结构模型,生成 100 年重现水平等场景^[32]。但由于地磁台站分布稀疏,广域大地电性结构复杂,基于现有简化模型的评估结果往往不完全符合实际情况,需要充分考虑观测数据分布和大地电性结构中各参数分布的不确定性,评估威胁场景的合理概率分布。

IEMI 与基础设施的相互作用涉及攻守双方的博弈过程,某处遭受攻击后再次被攻击的可能性是未知的,因此用常规概率场景难以进行刻画。一种可行方案是将概率替换为资源需求和合理性^[29],前者是成功实施攻击场景所必需的最小数量和类型的设备,后者是对拥有相应动机、知识和资源的攻击者存在程度的主观评估,以此给出 IEMI 威胁场景。

3.3 关键设备的电磁易损性机理和评估研究

易损性研究是指通过仿真和实验手段分析设备失效机理和原因,并建立起元件易损性模型,从而识别电网中的关键薄弱环节,为系统级电磁风险评估及防御策略等后续相关研究提供重要支撑。

在元件的电磁耦合建模仿真方面,常用的方法包括电磁拓扑方法、多物理场耦合仿真技术等。电磁拓扑方法将电磁干扰问题与拓扑理论相结合,通过对研究对象的区域分解降低了问题的复杂度,能够有效处理复杂系统的电磁耦合问题。近年来多物理场耦合建模仿真技术得到了迅猛发展,它能够有效地综合考虑强电场效应、磁效应和热效应等多种效应机理^[25,33]。通过分析器件或设备内部的电磁场、响应电压电流、温度场等关键物理量的分布,能够有效得出设备中的强耦合通道和潜在失效环节。但由于电气电子设备自身结构和效应机理物理过程的复杂性,很难直接在上述物理场与设备失效结果之间建立明确的数学模型。因此一般多采用仿真建模与效应试验相结合的办法来完善易损性模型,然后通过对数据的统计学分析,获取该设备的阈值、敏感频段等关键参数。国内外已对光伏发电系统、变电站 SCADA 系统、配电系统变压器及绝缘子等部分电气电子设备开展了 HEMP 主要耦合路径分析与易损性研究^[34-37]。

目前针对小型电子设备及系统的电磁敏感度仿真建模相对比较成熟,但在 HEMP 等宽频带电磁环境激励下变压器、直流系统换流阀等大型高压电力设备的仿真模型难以获取、计算规模超大,亟待建立相关设备的宽频仿真模型并研究高效算法。另外,在效应试验手段方面,设备在不带电和带电情况下的效应结果可能具有较大差别,因此需要具备对运行状态的大型电气设备进行试验的能力,使得试验条件与设备实际运行工况应尽量一致。还有,受到被试设备和效应试验的成本限制,一般只能对电气设备进行小样本试验,也需要发展考虑不确定度的小子样系统级评估方法。

3.4 电磁恢复力的评估理论和指标体系

电磁环境对广域基础设施的系统级风险评估,需要基于各设备电磁易损性模型,并考虑各个分系统之间、多种效应之间的故障链耦合传递模式。HEMP 和地磁暴等电磁威胁的覆盖范围广、敏感对象多,受影响的关键基础设施之间具有相互依赖关系,因此广域基础设施的电磁故障传递模式的分析通常具有相当的复杂性。

比如,变压器在 GIC 作用下所产生无功损耗剧增、谐波增大、变压器温升等次生效应,会在电网中进一步产生复杂的交互影响;HEMP E1 的敏感对象涵盖了电力系统中大量电力及电子设备,需要对电网一次、二次部分效应的影响进行综合评估;考虑 HMEP 早、中、晚期成分的时序特征,需要考虑其协同效应。此外,随着能源互联网的建设,各种能源系统之间、各类基础设施之间的联系日益密切,连锁故障模式的种类和概率也大为增加,需要开展考虑关键基础设施间相依关系的全局电磁风险评估。因此在强电磁环境致灾的风险评估模型和指标定义上,需要对上述复杂耦合传递关系予以全面的考虑。

传统的电力系统可靠性指标,通常基于长期的元件故障率统计数据,采用失负荷概率(LOLP)、电量供应不足期望(EENS)等静态的期望值来衡量系统风险,因而对小概率、高影响事件考虑不充分,而且无法反应在外部事件冲击下的系统动态响应特征。针对小概率、高影响的特性,学者不断探索,一种办法是基于分割多目标风险分析理论,将系统的风险状态进一步细化分割为多个范围,进而利用条件期望风险函数来度量系统处于不同范围的风险^[38]。如果考虑极端事件期间系统状态的时变特性,还需要从静态指标发展向动态指标,利用扰动前、中、后的三阶段指标体系来表征外部冲击下的电网恢复力^[39-40]。

3.5 电磁恢复力提升策略

电网等国家基础设施具有分布范围广、规模大、敏感单元众多的特点,考虑到强电磁环境高影响、小概率的特点以及防护经济性的要求,电网等国家关键基础设施的强电磁环境防御策略与军事装备不同,需要基于关键设备优先、物理加固与运行措施相结合等原则,形成预防、保护、快速恢复三者相平衡的关键基础设施强电磁环境应对策略。

3.5.1 预警与预防

在预防方面,研究强电磁环境识别评价和监测预警理论及机制,与现有的电力系统灾变防御系统相结合,研究电力系统相应的应急控制方案。HEMP 预警、IEMI 威胁源的监测定位、磁暴预警等电磁环境预警能力建设日益受到重视^[5,9,41]。以地磁暴为例,可以将空间天气预报与 GIC 监测数据相结合,形成全链条的 GIC 预测活动。考虑到地磁暴物理机制和时变规律的复杂性,实现 GIC 的准确预测目前仍有较大难度,需要对预测模型不断完善。基于空间天气预报来快速评估影响程度和范围,并制定应急响应方案。当磁暴达到一定等级时,电力系统进入预警状态,并采取一系列应急控制措施:如降低输电线路和变压器的无功功率限值,进行发电调度以提供充足的无功功率备用,对跳闸的电容器组和 SVC 进行重合闸保证充足的无功功率补偿,调整发电机励磁系统以维持系统电压等^[41]。

3.5.2 保护与加固

对于广域分布的基础设施,考虑防护的经济性,一方面需要基于系统级风险评估结果,对关键节点进行重点防护加固,另一方面需要将物理防护与运行措施相结合。

针对基础设施中的关键薄弱环节,需要研发新的具有成本效益的保护手段。具体技术手段包括:采用快响应避雷器、新型浪涌保护器件等,实现对 HEMP E1 的 ns 级陡波响应;采用变压器中性点加装隔直装置等措施,提升变压器的抗直流偏磁能力;采用电磁屏蔽型建筑材料,用于关键变电站及发电厂等大型设施的电磁防护等。将上述加固措施与基础设施现有防护设备及系统进行功能整合,有助于降低防护成本。比如对于高频分量防护,分析 HEMP, IEMI 防护需求与当前电网中针对雷电、开关暂态等在防护标准的异同,尽可能采取 HEMP, IEMI、雷电和快速暂态过电压(VFTO)的综合保护方案;对于 HEMP E3、地磁暴的低频防护,输电系统加装串联补偿、变压器中性点加电容或小电阻等隔直装置是当前行之有效的应对措施,这方面在直流输电接地极入地电流治理已有相关实践。但对于 HEMP 和地磁暴等广域电磁环境,进行局部治理可能导致其余变压器 GIC 的增加^[22],因此治理方案需要在整个网络层面进行全局统筹优化。

在运行方面,以三道防线为核心的电力系统安全防御体系在强电磁环境防护中仍然发挥重要作用。但对于 HEMP 等引发的广域多重故障及其可能引发的连锁故障,继电保护、电网解列等手段对强电磁环境威胁的响应能力仍然需要进一步研究,根据其有效性及差距等评估结果来提出应对方案。

3.5.3 快速恢复

在快速恢复方面,首先实现关键节点的快速恢复,然后逐步恢复电力系统的整体性能。研究相应决策支持系统,通过受灾情况汇总和系统状态快速评估,提出相应的应急预案、人力和物资的优化调度及决策方法。考虑到 HEMP 等强电磁环境对通信系统的威胁,需要关注灾后决策系统与维修人员之间的应急信息联络问题。

在设备级层面,需要研究对大量故障设备的识别、诊断和恢复策略。HEMP 会对基础设施中大量电气和电子设备造成不同程度的破坏,需要对相关故障设备实现快速检测和诊断。另外,需要保障关键设备的灾后恢复能力,如推广可拆卸变压器等技术、增加高风险设备的备用元件存储等。在系统级层面,现有黑启动等灾后恢复方案需要针对强电磁环境进行专门强化,用于黑启动的发输电设备都需要进行相关测试,保证其在恢复过程中能够正常工作。近年来,微电网和主动配电网在灾后恢复过程中的作用受到了广泛重视^[31]。微电网是接在中压或低压配电馈线上的小型电力系统,可运行于孤岛模式或并网模式。利用分布式发电机组和储能装置,微电网可以保障关键负荷的灾后供电服务,也可以辅助电网的黑启动和负荷恢复,有效促进灾后电力系统的恢复进程。需要注意的是,相关研究表明 HEMP 的 E1 成分能够造成配电系统大量线路受损和绝缘子闪络等,因此微电网在 EMP 威胁下的生存能力仍需得到预先证实和进一步研究。

4 电磁恢复力的研究展望

电网和油气管网等能源系统、通信系统和交通系统等国家关键基础设施是现代社会的基石,因此尤其需要保障其在 HEMP, IEMI 和 GMD 等强电磁环境下的安全运行。本文初步探讨了关键基础设施电磁恢复力的概念内涵和外延,并给出现阶段电磁恢复力的研究建议和考虑。相关研究不仅能够显著提高我国电力系统等关键基础设施应对强电磁环境威胁的能力,而且对于有效应对地震、冰灾等其他灾害也大有裨益。基础设施的电磁恢复力研究后续可开展下述工作:(1) 完善变压器等关键设备运行状态的效应仿真和实验手段,积累基础设施效应数据;(2) 发展适用于关键基础设施电磁安全的小概率、高风险评估理论;(3) 研究针对基础设施的预防、保护和恢复三者平衡的高效费比应对方案;(4) 将电磁恢复力提升工作纳入电网应急管理建设,开展工程示范。

参考文献:

- [1] Foster J S, Gjelde E, Graham W R, et al. Report of the commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse (EMP) attack, Volume 1: Executive report[R]. 2004.
- [2] Foster J S, Gjelde E, Graham W R, et al. Report of the commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse (EMP) Attack; Critical national infrastructures[R]. 2008.
- [3] Graham W R, Foster J S, Gjelde E, et al. Assessing the threat from electromagnetic pulse (EMP): Executive report[R]. 2017.
- [4] North American Electric Reliability Corporation (NERC) and the U. S. Department of Energy. High-impact, low-frequency event risk to the North American bulk power system[R]. 2010.
- [5] U. S. Department of Energy and the Electric Power Research Institute. Joint electromagnetic pulse resilience strategy[R]. 2016.
- [6] U. S. Department of Energy. U. S. Department of Energy electromagnetic pulse resilience action plan[R]. 2017.
- [7] Horton R. High-altitude electromagnetic pulse and the bulk power system: Potential impacts and mitigation strategies[R]. Electric Power Research Institute, 2019.
- [8] The White House. Executive order on coordinating national resilience to electromagnetic pulses[EB/OL]. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-coordinating-national-resilience-electromagnetic-pulses/>.
- [9] Arnesen O, Hoad R. Overview of the European project ‘HIPOW’[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, 3(4): 64-67.
- [10] Deniau V. Overview of the European project security of railways in Europe against electromagnetic attacks (SECRET)[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, 3(4): 80-85.
- [11] Stefan V D B, Dawson J, Flintoft I, et al. Overview of the European project STRUCTURES[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, 3(4): 70-79.
- [12] 祁国成, 李科杰, 李亚峰, 等. 油气管道数据采集与监视控制系统电磁脉冲效应实验[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 123202. (Qi Guocheng, Li Kejie, Li Yafeng, et al. Experimental study on effects of electromagnetic pulse on pipeline supervisory control and data acquisition(SCADA) system. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 123202)
- [13] 黄忠胜, 陈宇浩, 杨明, 等. 基于贝叶斯方法的设备级电磁脉冲效应评估[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 125002. (Huang Zhongsheng, Chen Yuhao, Yang Ming, et al. Effect assessment of electromagnetic pulse at equipment level based on Bayesian method. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 125002)
- [14] 束国刚, 杜子韦华, 黄玮, 等. 核电站最小安全系统电磁脉冲效应试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 103203. (Shu Guogang, Du Ziwei, Huang Wei, et al. Experiment research on electromagnetic effects of minimum safety system in nuclear power plant. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 103203)
- [15] 国家能源局. 电力行业应急能力建设行动计划(2018-2020)[EB/OL]. (National Energy Administration. Plan of action for emergency capacity construction in the electric power sector(2018-2020). http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto93/201808/t20180807_3222.htm)

- [16] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787. (Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards; a review. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(8): 781-787)
- [17] IEC61000-2-9, Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 2: Environment—Section 9: Description of HEMP environment—Radiated disturbance[S].
- [18] Giri D V, Tesche F M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME)[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 322-328.
- [19] IEEE Power & Energy Society Technical Council Task Force on Geomagnetic Disturbances. Geomagnetic disturbances; their impact on the power grid[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2013, 11(4): 71-78.
- [20] Boteler D H, Pirjola R J. Modeling geomagnetically induced currents[J]. Space Weather, 2017, 15(1): 258-276.
- [21] Shetye K, Overbye T. Modeling and analysis of GMD effects on power systems; an overview of the impact on large-scale power systems [J]. IEEE Electrification Magazine, 2015, 3(4): 13-21.
- [22] 刘连光. 大规模电网应对空间灾害天气的问题[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 1-5. (Liu Lianguang. Scientific issues on how to cope with damage in large-scale power grid caused by disastrous space weather. Power System Technology, 2010, 34(6): 1-5)
- [23] 薛禹胜, 谢云云, 文福拴, 等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 1-9. (Xue Yusheng, Xie Yunyun, Wen Fushuan, et al. A review on cascading failures in power system. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 1-9)
- [24] 乔登江. 高功率电磁脉冲、强电磁效应、电磁兼容、电磁易损性及评估概论[J]. 现代应用物理, 2013, 4(03): 219-224. (Qiao Dengjiang. Introduction to HPEMP, IEME, EMC, and EM susceptibility and its assessment. Modern Applied Physics, 2013, 4(03): 219-224)
- [25] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014(6): 1605-1613. (Liu Shanghe, Liu Weidong. Progress of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection. High Voltage Engineering, 2014(6): 1605-1613)
- [26] Baker G H. Risk-based national infrastructure protection priorities for EMP and solar storms[R]. 2017.
- [27] Genender E, Garbe H, Sabath F. Probabilistic risk analysis technique of intentional electromagnetic interference at system level[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(1): 200-207.
- [28] Ängskog P, Näsman P, Mattsson L G. Resilience to intentional electromagnetic interference is required for connected autonomous vehicles [J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, to be published.
- [29] Oakes B D, Mattsson L G, Näsman P, et al. A systems-based risk assessment framework for intentional electromagnetic interference (IE-MI) on critical infrastructures[J]. Risk Analysis, 2018, 38(6): 1279-1305.
- [30] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9. (Bie Zhaohong, Lin Yanling, Qiu Aici. Concept and research prospects of power system resilience. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9)
- [31] Wang Y, Chen C, Wang J, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—A review[J]. IEEE Trans Power Systems, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [32] Thomson A W P, Dawson E B, Reay S J. Quantifying extreme behavior in geomagnetic activity[J]. Space Weather, 2011, 9(10).
- [33] 李立涅, 饶宏, 董旭柱, 等. 计算高电压工程学的思考与展望[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3441-3453. (Li Licheng, Rao Hong, Dong Xuzhu, et al. Prospect of computational high voltage engineering. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3441-3453)
- [34] Nyffeler M, Kaelin A W. EMP-hardened photovoltaic generators; a possible emergency power solution for critical infrastructure? [R]. System Design and Assessment NOTE 47, 2016.
- [35] Savage E, Gilbert J, Radasky W. The early-time (E1) high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) and its impact on the US power grid [R]. Meta-R-320, 2010.
- [36] Minter T, Mooney T, Artz S, et al. Understanding design, installation, and testing methods that promote substation IED resiliency for high-altitude electromagnetic pulse events [C]//2017 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). 2017: 1-18.
- [37] Parfenov Y V, Zdoukhov L N, Shurupov A V, et al. Research of flashover of power line insulators due to high-voltage pulses with power on and power off[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 467-474.
- [38] Wang X, Xie S, Wang X, et al. Decision-making model based on conditional risks and conditional costs in power system probabilistic planning[J]. IEEE Trans Power Systems, 2013, 28(4): 4080-4088.
- [39] Panteli M, Trakas D N, Mancarella P, et al. Power systems resilience assessment; hardening and smart operational enhancement strategies [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1202-1213.
- [40] Ji C, Wei Y, Poor H V. Resilience of energy infrastructure and services: Modeling, data analytics, and metrics[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1354-1366.
- [41] PJM manual 13; Emergency operations[EB/OL]. 2018. <http://www.pjm.com//media/documents/manuals/m13.ashx>.