

北美可靠性风险评价指标及应用分析

刘文霞, 李征洲

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 为了支撑我国可靠性标准的改进和对执行过程的监督, 需要建立完善的可靠性评价指标。首先总结了北美大电力系统的可靠性标准体系及标准驱动指标(Standards Driven Index, SDI)中标准的选择原则。随后, 剖析了SDI指标的设立目的、发展流程、性能指标模型和数据来源等方面, 结合案例重点分析了风险指标CP-1和影响指标CP-2的应用情况和改进建议。最后, 通过对我国现阶段可靠性标准制定和风险管理现状分析, 指出我国在可靠性标准体系、事件分析和数据管理方面还有待改善。建议完善并扩大可靠性指标领域, 加强事件跟踪分析并建立统一的数据库, 以降低电力系统风险。

关键词: 风险评估; 可靠性指标; 数据管理; 事件分析; 可靠性管理

North American reliability risk assessment indicators and application analysis

LIU Wenxia, LI Zhengzhou

(State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to support the improvement of China's reliability standards and the supervision of the implementation process, it is necessary to establish a sound reliability evaluation index. Firstly, this paper summarizes the reliability standard system of North American power system and the selection criteria for the Standards Driven Index (SDI). Subsequently, the purpose of the establishment of SDI indicators, development process, performance indicators and data sources are analyzed. After that, the application of risk indicators CP-1 and impact indicators CP-2 and suggestions for improvement are specifically analyzed with the case study. Finally, in view of the current situation of the reliability standard and risk management system in China, it is pointed out that China still needs improvement in terms of reliability standard system, event analysis and data management. It is recommended to improve and expand the field of reliability indicators, strengthen incident tracking analysis, and establish a unified database to reduce power system risks.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100) and Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (No. 521104170043 and No. SGTYHT/16-JS-198).

Key words: risk assessment; reliability index; data management; event analysis; reliability management

0 引言

随着科技进步和社会发展, 用户对电力可靠性的需求不断提高, 而且由于大量可再生能源发电的接入, 加剧了电力系统运行的不确定性, 增加了系统间的相互依赖性和复杂性, 使电力系统的可靠性面临着严峻的挑战。电力系统要持续提高可靠性, 必须明确影响系统可靠性的因素以及其引起的后果, 根据风险的大小决策实施改进的措施。因此, 如何

度量系统的风险是电力企业可靠性管理面临的亟待解决的重要问题。

风险评估已逐步成为电力企业各类决策的重要依据, 也是电力工业一项具有挑战性的基本任务。近年来针对电力风险评估的研究已经取得了很多理论和成果^[1-6], 并在电力系统规划、运行、检修等方面得到应用。文献[1-3]指出电力系统风险评估中, 运行风险可分为日前和实时, 在评估时考虑的不确定因素包括设备故障、负荷、风力发电、灾害、保护隐性故障等; 文献[4-6]根据各自应用场景特征建立了描述风险概率特征和后果的量化模型, 并提出了评估的方法。中国南方电网公司在电网安全运行

中考虑内部因素和外部因素,采用系统 $N-1$ 静态安全分析、系统潮流及无功电压分析等方法来进行检修和运行的决策。上述风险评估都是用于系统的事前决策。受评估时间、计算效率、模型精度和风险种类的局限,与系统实际遭受的统计风险具有很大的差别^[7-9]。当今很多复杂的系统,如通信、财政、电力系统,都通过基于历史运行信息的综合风险评估,以最经济的手段降低了风险,极大地提高了系统的可靠性。

北美作为世界上最早开展电力可靠性管理的地区,于2007年开始研究基于大量集成历史运行数据的大电力系统可靠性风险评估体系^[10],目的是通过评估找到系统的严重风险所在,并帮助降低风险和事故的发生概率,而风险识别是其量化评估的基础。北美电力可靠性公司(North American Electric Reliability Corporation, NERC)下属的性能分析委员会(Performance Analysis Subcommittee, PAS)^[11]认识到:以往在风险识别中常用的决策树等分析方法比较适用于各组件的概率特征以及各变量之间的相互依赖关系比较明确的系统,而当前系统面临多种外部影响,包括很多输入、新器件和应用系统的使用,使得大多数事件发生的概率和后果未知,导致这些方法已不再适用。故此,NERC 提出要开发一套风险管理工具,包括风险识别和分类量化风险事件的严重度。经过几年的研究,NERC 于2010年发布大电力系统(Bulk Power System, BPS)综合风险评估体系^[12]的白皮书,并开发了综合可靠性风险指标(Integrated Reliability Index, IRI)体系。IRI 从系统状态、系统事件、违反可靠性标准三个维度,建立了状态驱动指标(Condition Driving Index, CDI)、事件驱动指标(Event Driving Index, EDI)和标准驱动指标(Standards Driven Index, SDI)三类指标体系^[13],并且根据这三类指标的独立性和关联性建立了风险信息综合模型,以显示三个风险集之间的所有可能的逻辑关系。

随着北美 PAS 研究工作的不断深入,其在2011年发布事件充裕性指标(Adequate Level of Reliability, ALR)和事件严重性指标(Event Severity Risk Index, SRI)来支撑 CDI 和 EDI 的评价。ALR 和 SRI 指标从2011年应用至今,逐年修改完善,发展已经基本成熟,并使得电力系统对可靠性事件的抵御能力和弹性有所提高。文献^[14]重点针对已经开发出来的“状态驱动指标 CDI”和“事件驱动指标 EDI”进行了模型和应用案例分析,并对我国未来可靠性风险管理提出了建议。而 SDI 指标用于反映事件风险的大小对标准的违反程度,其2015年开始才取得很大进展。

随着我国电力改革不断深入,多种资本的介入,承担大部分电力可靠性保证工作的电网企业盈利空间缩小,基于风险的决策已经势在必行。然而我国对可靠性的管理还停留在设备故障管理阶段,与北美等发达国家有很大差距,电力企业联合会也在为可靠性管理改进进行准备^[15]。本文通过收集大量资料调研北美可靠性标准体系,深度分析与之相应的“标准驱动指标”的设立目标、指标模型以及数据来源等,并结合具体事件对该指标的应用情况和有待改进的地方进行了总结,以期对北美 BPS 系统三大指标体系有一个全面的了解,为我国可靠性标准体系的改进,标准执行情况的监测跟踪以及风险评估的应用提出建议。

1 北美大电力系统可靠性标准体系

NERC 从1968年开始研究北美大电力系统的可靠规划和运行,并负责制定可靠性标准。通过定义各种指标,可以确定电力系统运行和维护的基本要求,同时减少级联故障的风险,避免主要设备的损坏和系统故障事件,在考虑成本效益影响的同时,有效地减轻了可靠性风险。北美大电力系统可靠性标准分为14个类别,共137项标准^[16],如表1所示,每个类别中的每个标准还可能具有不同的要求,例如“BAL-001-2 R1”即表示供需平衡类别中序号为001-2标准下的要求1。这些要求可以用于电力系统实时操作、日前操作、运营规划、长期规划及运行评估等。

电力系统事故是指由于电力系统设备故障或人员工作失误,影响电能供应数量或质量并超过规定范围的事件。而引起电力系统事故的原因是多方面的,如自然灾害、设备缺陷、管理维护不当、检修质量不好、外力破坏、运行方式不合理、继电保护误动作和人员工作失误等,这些都可以看作是违反可靠性标准的行为。

2 SDI 设立目的及标准选择依据

2.1 指标设立的意义

NERC 自2007年开始强制执行可靠性标准,为每一个可靠性标准都赋予了不同的风险值,针对其中具有高风险的标准进行违规的事件监测,并制定了标准驱动指标 SDI,通过对违规事件的统计和分析,评价违规事件引起的风险和后果,寻找电力系统运行的薄弱环节,以促使各电力企业及组织减少违规事件的发生,向着合规性标准改进,降低系统风险。从2010年提出至今,NERC 每年对电力系统合规性进行测量和分析,并不断完善指标的建立。

表 1 可靠性标准分类

Table 1 Reliability standard classification

分类	描述	应用
1 供需平衡标准(BAL)	能确保供需资源平衡, 监测供需水平	规划、评估 实时/日前操作
2 关键基础设施保护标准(CIP)	一系列保护基础设施的规定, 包括可持续的安全管理机制, 物理安全保护等	长期规划
3 通信标准(COM)	能建立运行人员之间的沟通和操作协议	长期规划 实时操作
4 应急预案运行标准(EOP)	能在发生故障后生成事件报告并启动应急预案, 例如系统恢复计划, 黑启动预案等	长期/运营规划 实时/日前操作
5 设备设计, 互联标准(FAC)	能记录和制定设备互连要求, 并使用深度防御机制避免级联故障	长期规划 实时操作
6 交叉调度与协作标准(INT)	确保责任单位在管理过程中能进行适当的通信, 并对每个交叉进行可靠性评估	实时操作
7 互连可靠性运行和协作(IRO)	能为系统提供监控可靠性功能所需的数据, 确保互连系统之间协调一致的动作	实时操作
8 模型、数据标准(MOD)	能建立统一可靠的计算模型和数据收集系统以支持电力系统分析和运行	长期规划
9 核电标准(NUC)	核电厂与传输单位之间能有效协调, 以确保核电厂的安全运行和停机	长期规划
10 人员标准(PER)	调度员必须具有足够的能力完成各项任务	实时操作
11 保护与控制标准(PRC)	能对抗扰动事件进行检测并报告, 确保自动重合闸装置和继电器处在工作状态	规划 运行评估 实时/日前操作
12 输电运行标准(TOP)	能确保迅速采取行动避免或减轻级联故障, 确保系统在规定的范围内运行	实时操作
13 输电规划标准(TPL)	能在计划范围内以及环境干扰事件中保证传输系统规划性能要求	长期规划
14 电压和无功标准(VAR)	能确保电压, 无功电流和无功装置在控制和维护的范围内	规划 运行评估

2.2 可靠性标准的违规风险因子和严重度定义

上述可靠性标准中的每一项具体要求都被赋予了不同的风险值, 即风险因子(Violation Risk Factors, VRF)和严重等级(Violation Severity Levels, VSL)^[17]。VRF 和 VSL 由 NERC 工作人员在制定可靠性标准的同时确定。通常在惩罚违反可靠性标准的电力企业时, 作为参考因素。具体内容如下。

1) 风险因子 VRF: 用来衡量电力企业的违规行为对电力系统可靠性造成的潜在影响。风险因子为违规行为和大电力系统可靠性之间建立了清晰和简

明的关联。VRF 考虑故障持续时间、电力公司规模大小、与其他电力公司的关系、是否承担主要责任、电压水平等因素分为三个等级: 较低风险、中等风险和高风险, 且一个要求只具有一个 VRF。

2) 严重等级 VSL: 用来衡量违规行为发生后对电力系统可靠性造成的实际影响。VSL 分为低、中、高和严重四个等级, 且与 VRF 不同, 根据造成影响的差异程度每个要求可能具有多个等级的 VSL, 例如标准 TOP-003-1 的要求 4(R4)中提出调度员应能解决潜在在可靠性冲突的调度问题, 该要求就按照恢复可靠运行的时间长度分为低、中、高和严重四个等级。

SDI 指标中的标准要求都是具有高 VRF 和严重 VSL 的, 基于这两个因素可以在北美大电力系统可靠性标准中筛选出需要进行监测的标准。这些标准要求涵盖了上述 14 类可靠性标准, 共计 300 余项, 具体内容可参见文献[18-19]。

3 SDI 性能指标模型

3.1 指标发展流程

为了量化电力系统违规事件对系统可靠性的影响, NERC 合规与认证委员会(Compliance and Certification Committee, CCC)于 2010 年制定了关键合规监测指标(Key Compliance Monitoring Index, KCMI), 作为 SDI 主要性能指标。该指标在计算时仅考虑在 SDI 标准要求中筛选出的具有代表性的 26 个标准要求^[20], 但是由于可靠性标准随着时间的推移而发生变化, KCMI 中包含的要求内容以及数量也将发生更替, 而这些变化并没有反映在指标的计算中, 导致违规信息的有效追踪变得越来越困难, 因此 2013 年底, 该指标正式退出。

在 KCMI 退役后, PAS 和 CCC 在 2015 年基于合规性和安全性开发了两个性能指标: 风险指标 CP-1 和影响指标 CP-2, 分别侧重违反标准的事件对系统造成的潜在风险和实际影响, 以便更有价值地收集行业违规行为的数据^[21]。

SDI 性能指标的发展流程如图 1 所示。



图 1 SDI 性能指标发展流程

Fig. 1 SDI performance indicator development process

3.2 风险指标: CP-1(Compliance Process-1)

CP-1 指标用于统计每季度可能会对 BPS 的可

可靠性造成严重威胁的违规事件, 并按违规发生的季度追踪具有严重风险的违规行为, 是一个季度计数指标。通过分析以往扰动事件对电力系统造成的风险和实际后果, 总结出以下几个在统计电力系统事件时需要考虑的问题:

1) 不是所有的电力系统事件都是因为违反可靠性标准造成的。

2) 违规事件造成的风险未必就是严重风险, 还可能是程度较低的风险。

3) 造成了严重风险的违规事件也未必就会对电力系统造成实际影响。

CP-1 指标仅统计对电力系统造成“严重风险”的事件, 而其依赖于电力可靠性组织执行人员确定潜在的风险^[22], 由于违规行为是在执行过程中产生的, 所以执行人员根据对过去电力系统事件产生的风险和影响进行风险评估, 考虑不同事件的实际情况, 具有一定主观性地为其分配具体的风险, 并且在季度内跟踪违规事件, 其中最严重的违规行为被视为“严重风险”。但严重风险违规是相对罕见的事件, 如图 2 所示, 在 2013—2016 年期间处理的违规行为, 仅有极少数违规行为被认为造成严重风险。

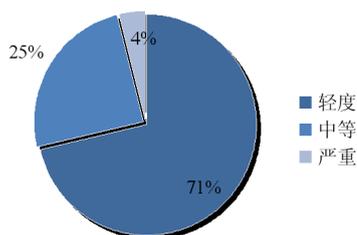


图 2 2013-2016 年违规行为风险分类

Fig. 2 2013-2016 classification of irregularities

3.3 影响指标: CP-2 (Compliance Process-2)

除了对可能会构成严重风险的违规事件进行分析外, NERC 还会评估这些事件是否会对可靠性产生实际影响, 影响指标 CP-2 即用来统计对大电力系统造成的“实际影响”的违规事件。对于报告的每一个可能违规行为, 无论是否具有风险, NERC 都将评估其是否对可靠性产生实际影响, 并以季度为周期计数。与风险指标 CP-1 评估不同的是, 此指标侧重于实际影响, 而不是造成的潜在影响, 即产生的风险^[23]。

CP-2 指标分为 4 个等级的影响层, 如图 3 所示, 各层的事件数量呈金字塔形分布, 第 3 层严重影响和第 2 层中等影响中, 观测的是相对罕见的事件, 在 2014 年处理的约 1 200 个违规中, 仅有 25 个第 3 层违规以及少数第 2 层违规。由于对“实际影响”

的定义具有一定主观性, 该分层列表将会随时间的推移, 进一步改进。

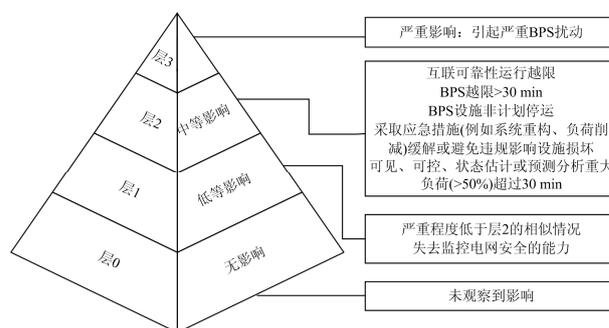


图 3 CP-2 影响分层

Fig. 3 CP-2 impact pyramid tiers

CP-1 和 CP-2 指标体现了哪些标准和要求在违反时可能造成严重风险, 哪些会造成实际的可靠性后果。这两个指标重点关注了电力系统最有风险和影响部分的事件和控制措施, 为识别电力系统中的薄弱环节提供了依据, 有助于改善电力系统可靠性。

4 数据来源及应用分析

4.1 统计数据来源

电力系统的基础数据、运行数据和故障数据是各类指标评价的基础。NERC 构建了大电力系统数据系统体系, 使风险指标及基础数据可以从数据库中提取计算, 以实现对系统关键结构保护情况、风险优先级、标准服从度等方面的全面评估。数据体系包括输电可用数据系统、发电可用数据系统、需求响应可用数据系统以及事件分析 4 个部分, 其中 SDI 中确定的违规事件一般来源于事件分析数据库, 如图 4。

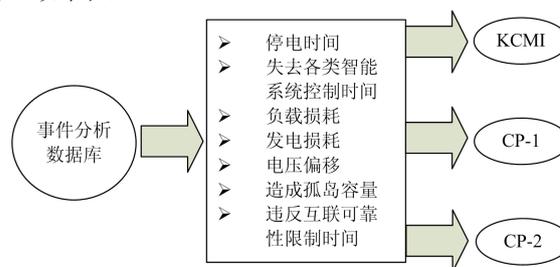


图 4 SDI 性能指标与事件分析数据库对应关系

Fig. 4 Correspondence between SDI performance indicators and event analysis database

事件分析数据库首先监测和了解超过一定范围的影响或风险的事件, 收集事件各方面信息, 为 SDI 指标的应用提供了可能性。可靠性组织对这些事件进行深入的自我检测, 根据经验分析, 总结经验教训以避免相同事件的重复发生。

事件分析数据库中还包含事件发生的原因代码,包括人为错误、能源管理系统故障、设备故障、保护系统误操作以及其他原因,为SDI指标分析事件根本原因提供了基础。

4.2 CP-1 指标应用分析

SDI 是一个对已经发生的事件进行统计分析的指标,不处理正在进行的或是预测到的违规行为。图5描述了自2007年开始强制性遵守可靠性标准以来,每个季度具有“严重风险”的违规行为的数量,由滚动平均数可以更加直观地看出事件发生频率的变化趋势。

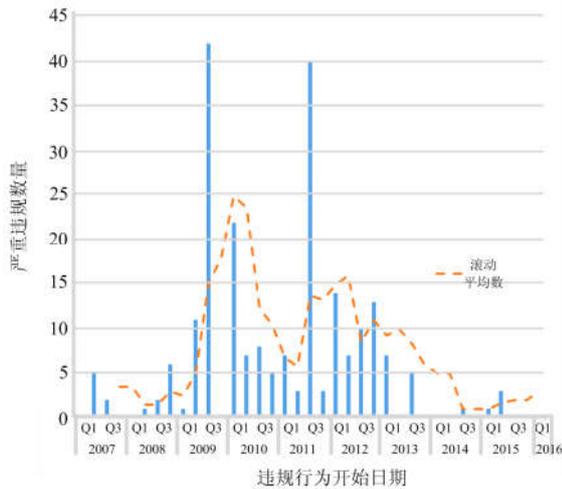


图5 2007—2016年严重风险违规数量

Fig. 5 Number of serious-risk violations in 2007—2016

由图5可以观察到,基于风险的严重违规行为基本上低于平均水平,但是在2009年第三季度和2010年第一季度数量明显升高,其原因是关键基础设施保护(CIP)可靠性标准开始实施,由于这些标准要求适用于更多的电力企业,因此调查范围更广,被发现的违规行为更多,出现了高峰。第二次峰值出现在2011年第三季度,主要归因于2011年9月8日的北美的西南部停电事件,NERC已经通过调查解决了由此产生的违规行为。此外,2013年,2014年和2015年发生的一些严重风险违规尚未完全在美国联邦能源监管委员会(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)提交,预计这三年严重风险违规行为数量将有所增加。

图6描述了自2012年以来在FERC提交的严重风险违反的标准要求。处罚与违规的严重程度相关,其他考虑因素包括对电网的风险影响、是否自我报告以及报告的及时性,如果进行了自我报告,则考虑该对象的规模大小和改进计划的质量等因素。一旦有企业违规,则需要缴纳违规罚金,一般

为0.1~100万美元。NERC在其网站上公布所有罚款通知,并向行业提供有关如何降低违规频率及其相关风险的信息,促使电力公司提高可靠性。

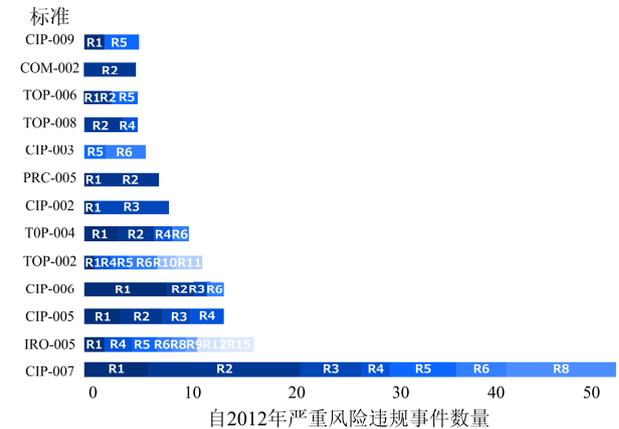


图6 严重风险违规的标准和要求

Fig. 6 Standards and requirements with serious-risk violations

CP-1 指标可以为电力可靠性组织提供数据,帮助行业降低违规事件的发生频率和相关风险,但是具有两个局限:

- 1) 虽然闭环反馈可以提高风险评估质量,但是风险评估仍然存在一定的主观性;
- 2) 严重风险违规是相对罕见的事件,因此追踪它们的信息是有限的。

因此在接下来的工作还需要进一步测试改进,例如如何将“严重风险”更加严格、可观的定义等。

4.3 CP-2 指标应用分析

图7描述了自2007年以来发生的对可靠性造成实际影响的违规行为数量,使用滚动平均数可以更加直观地看出各层违规事件发生频率的变化趋势。

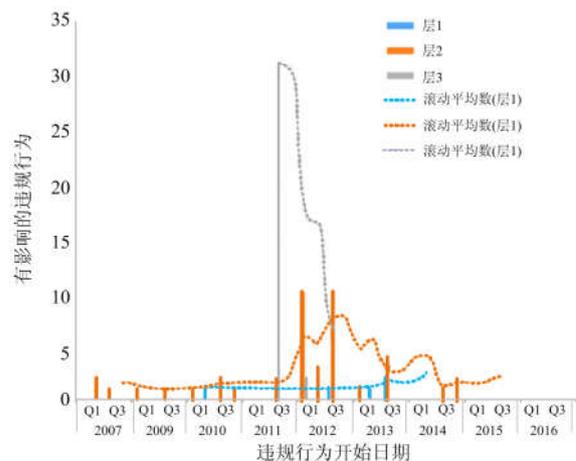


图7 2007—2016年影响可靠性违规行为数量

Fig. 7 Number of violations affecting reliability in 2007—2016

如图 7 所示, 由于 2011 年 9 月 8 日在北美的西南部分发生了电力扰动事件, 造成大规模停电, 因此 2011 年第三季度的违规行为数量明显增加。2012 年第三季度违规数量的飙升则是归因于 2012 年 3 月 31 日西部地区可靠性互联的违规行为, FERC 已经向其提出罚款通知。与 CP-1 指标的趋势一样, 有实际影响的违规行为数量保持在相对较低的水平。

图 8 显示了 2014 年和 2015 年提交的造成电力系统实际影响的事故违反频率最高的标准要求。

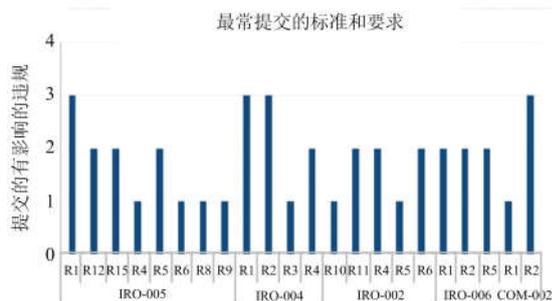


图 8 最常见的违规行为

Fig. 8 The most frequently filed standards and requirements

图 8 中违反 IRO 和 TOP 标准的违规行为, 大多数是由于西南地区的停电事故和可靠性互联事件造成的, NERC 已经对相关违规企业提出了处罚通知。此外, 值得说明的是, 截止到 2016 年第一季度, NERC 只发布了一次 CIP 的违规行为, 经过审查发现了该电力企业 14 项违背 CIP 标准的行为, 最终对该违规企业处以罚款十五万美元并立即采取补救措施以减少未来违规风险的决定^[24]。

电力可靠性组织的工作人员可以通过 CP-2 指标监测和分析有实际影响的违规行为, 从而减少有影响的违规行为的频率和后果。但是由于指标投入使用时间短, 还应该继续更新细化指标, 对每个指标中所叙述的违规行为从造成的影响或潜在风险出发, 具体分析因果关系、跟踪事件发生根本原因, 建立更细致的合规性要求, 从源头发现问题并解决问题。

5 我国可靠性管理现状及发展建议

我国于 2007 年签发实施《电力可靠性监督管理办法》, 对电力可靠性信息系统建立和可靠性信息的分析应用等工作都进行了详细要求, 标志着电力可靠性工作正式纳入了我国电力监管体系。目前, 我国电力系统的可靠性管理涉及到两个方面的工作, 一方面是对历史数据的统计, 另一方面是进行设施的可靠性评估, 后者所采用的可靠性评估方法大致可以分为解析法和蒙特卡罗模拟法。然而, 长

期以来我国对电力系统可靠性的统计评价还侧重于对系统中单台设施的评价, 缺乏计及设施可靠性、网架坚强程度的系统可靠性综合评价, 这在一定程度上影响了我国电力系统可靠性评价的全面性。因此在 2012 年国家电网公司制定了回路的相关评价规程, 考虑了回路之中设施以及回路内部逻辑关系对回路实现正常输送电能功能的影响, 基础数据管理方面也正在从以元件为基本单元升级到以回路为基本单元^[25]。

近年来, 随着大规模风电、光伏发电等新能源电力系统的发展越来越迅速, 其负荷、设备故障以及天气等因素的多重不确定性, 致使沿用传统确定性 $N-1$ 准则的规划、运行方法将不再适用, 因此我国开始开展基于风险的可靠性评价, 各种考虑分布式能源、天气因素等不确定性的风险指标^[26]和评价方法也在逐步改进^[27]。

尽管如此, 对比国内外可靠性管理现状, 我国仍存在以下问题:

1) 我国电力系统可靠性指标制定的年代参差不齐, 更新速度缓慢, 随着大量不确定性能源的接入, 现有指标已经不能满足现代电力的需求。

2) 我国对于电力系统事件的跟踪分析还没有明确要求, 也没有相关信息的统计和分析。

3) 我国现阶段在发、输、配电的数据收集上各自独立, 相互之间没有明确的关系, 而且监管部门和电力企业享用相同的数据, 对监管造成了不便。

因此, 为解决以上问题, 结合本文研究内容, 提出以下几点意见:

1) 建立完善的电力系统可靠性标准

建议未来电力系统应该综合考虑事件及其风险, 参照北美大电力系统可靠性标准, 通过 3~5 年形成规范的可靠性标准体系, 各企业在规划范围内有计划地专项开展工作, 实现与国际通行标准全面接轨。此外, 还应逐步扩大可靠性管理标准领域, 使可靠性管理工作从事后统计分析型向事前评估型延伸, 积极开展可靠性预测和规划工作, 以适应电力市场化改革对电力可靠性工作提出的新要求。

2) 分析和跟踪电力系统事故

建议我国在下一步可靠性评价中加强对电力系统事件的分析与跟踪, 在完善指标体系的过程中引入 SDI 类似指标, 并建立事件分析数据库, 全面收集事件信息, 突出对大事件的分析与跟踪, 找出深层次原因, 明确事件如何发生、如何处理, 提出改进规程和预防措施的办法。

3) 建立各类指标历史信息数据库

建议参考北美大电力系统的数据管理系统, 将

发、输、配电三个数据库之间建立联系,形成统一的数据体系,保存各年的可靠性指标统计信息,并开展面向服务的大数据分析,提供差异化模型和参数,为规划和运行决策以及提高可靠性、降低灾害损失建设提供信息支撑。

6 结语

随着大规模新能源电力系统的迅速发展,基于风险的评估和管理越来越受到世界各国的关注。本文以此为研究对象,通过收集大量国内外资料,从指标设立意义、发展流程、指标依据的可靠性标准体系、统计模型和数据计算来源等方面对SDI指标进行了全面的研究和梳理,具有一定先进性。在对其理论研究的基础上,本文选取了该指标的典型统计曲线,结合具体北美地区发生的可靠性事件,对风险指标和影响指标的应用情况进行了分析,指出该指标由于使用时间较短,在合规要求和风险等级定义等方面都应该继续更新细化。最后,通过对比国内外可靠性风险管理现状,指出我国在可靠性指标建立,事件分析跟踪及数据收集方面还有待改进,并提出了相关意见。本文对寻找系统运行状态的薄弱环节可以起到一定指导作用,对我国未来运行和规划导则的修订也具有借鉴意义。下一步工作可以结合需求侧响应,考虑电力系统弹性,进一步完善可靠性管理。

参考文献

- [1] 黎静华,左俊军,汪赛.大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J].电网技术,2016,40(11):3503-3513.
LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503-3513.
- [2] 邓红雷,戴栋,李述文.基于层次分析-熵权组合的架空输电线路综合运行风险评估[J].电力系统保护与控制,2017,45(1):28-34.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [3] 侯赞,刘宝柱,张爽.基于随机集理论的电力系统运行风险评估[J].电网技术,2017,38(1):1-7.
HOU Zan, LIU Baozhu, ZHANG Shuang. Power system operational risk assessment based on random set theory[J]. Power System Technology, 2017, 38(1): 1-7.
- [4] 丰颖,俞志皓,周琼,等.考虑风电接入的在线风险评估和预防控制[J].电力自动化设备,2017,37(2):61-68.
FENG Ying, YUN Zhihao, ZHOU Qiong, et al. Online risk assessment and prevention control of wind power access[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 61-68.
- [5] 丁一,江艺宝,宋永华,等.能源互联网风险评估研究综述(一):物理层面[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3806-3817.
DING Yi, JIANG Yibao, SONG Yonghua, et al. Review of risk assessment for energy internet, part I: physical level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3806-3817.
- [6] 龙日尚,张建华,蒙园,等.严重灾害下特高压交直流电网风险评估方法[J].电网技术,2017,41(9):2939-2946.
LONG Rishang, ZHANG Jianhua, MENG Yuan, et al. Risk assessment method of UHV AC/DC power system in serious disasters[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2939-2946.
- [7] 胡臻,李欣然,刘光晔,等.基于稳定影响度指标的电压稳定脆弱点分析[J].电工技术学报,2017,32(7):150-157.
HU Zhen, LI Xinran, LIU Guangye, et al. Analysis of voltage fragility area based on the stability influence index[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 150-157.
- [8] 廖一名,李珊君.基于边临毁度的电力通信网脆弱性分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(4):152-159.
LIAO Yiming, LI Shanjun. Vulnerability analysis of power communication network based on invalid proximity of edge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 152-159.
- [9] 戴志辉,谢军,陈曦,等.基于动态贝叶斯网络的智能变电站监控系统可靠性分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(23):68-76.
DAI Zhihui, XIE Jun, CHEN Xi, et al. Dynamic Bayesian network based reliability evaluation of supervision and control system in smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 68-76.
- [10] 谢伟.北美与英国输电系统可靠性评价方法及启示[J].供用电,2009,26(1):1-3.
XIE Wei. Evaluation methods of the reliability for transmission systems in North America & Britain and the Inspiration[J]. Distribution & Utilization, 2009, 26(1): 1-3.
- [11] NERC. 2012 state of reliability[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. https://www.nerc.com/pa/RAPA/PA/Performance Analysis DL/2012_SOR.pdf.

- [12] NERC. Integrated bulk power system risk assessment concepts[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. <https://www.nerc.com/comm/PC/PerformanceAnalysisSubcommitteePASDL/IntegratedBulkPowerSystemRiskAssessmentConceptsFinal.pdf>.
- [13] NERC. Integrated reliability index whitepaper[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. https://www.nerc.com/comm/PC/PerformanceAnalysisSubcommitteePASDL/IRI_Whitepaper_Comments.pdf.
- [14] 刘文霞, 单晓东, 江伟民, 等. 北美大电力系统可靠性风险评估体系及启示[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3811-3817.
LIU Wenxia, SHAN Xiaodong, JIANG Weimin, et al. Risk assessment system of NERC bulk power system and its inspiration[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3811-3817.
- [15] 刘文霞, 王舒, 陈盛君, 等. 国内外输电网可靠性性能管理对比分析[J]. 供用电, 2016, 33(10): 45-50.
LIU Wenxia, WANG Shu, CHEN Shengjun, et al. Comparison and analysis on the transmission grid reliability performance management between domestic and overseas[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(10): 45-50.
- [16] NERC. Reliability standards for the bulk electric systems of North America[S/OL]. North Tower Atlanta: NERC, [2017-10-29]. <https://www.nerc.com/pa/Stand/VRFMatrix/VRFStandardsApplicabilityMatrix2017-07-03.xlsx>
- [17] NERC. Reliability performance metrics[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. https://www.nerc.com/docs/pc/rmwg/Reliability_Metrics_white_paper.pdf.
- [18] VRF standards applicability matrix 2017-07-03[S]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. <https://www.nerc.com/pa/Stand/VRFMatrix/VRFStandardsApplicabilityMatrix2017-07-03>.
- [19] VSL matrix complete 2017-07-03[S/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. https://www.nerc.com/pa/Stand/VSLMatrix/VSL_Matrix_Complete_2017-07-03.
- [20] NERC Performance Analysis Subcommittee. Standards driven index[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. <https://www.nerc.com/comm/PC/PerformanceAnalysisSubcommitteePASDL/SDIWhitepaper.pdf>
- [21] NERC. 2014 state of reliability[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. <https://www.nerc.com/pa/RAPA/PA/PerformanceAnalysisDL/2014SORFinal.pdf>.
- [22] NERC. 2015 state of reliability[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. <https://www.nerc.com/pa/RAPA/PA/PerformanceAnalysisDL/2015StateofReliability.pdf>.
- [23] NERC. 2016 state of reliability[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. <https://www.nerc.com/pa/RAPA/PA/PerformanceAnalysisDL/2016SORReportFinalv1.pdf>.
- [24] NERC. Enforcement actions[R/OL]. North Tower Atlanta: NERC[2017-10-29]. <https://www.nerc.com/pa/comp/CE/EnforcementActionsDL/FinalFiledNOPNOC2391.pdf>.
- [25] 肖雅元, 张磊, 罗毅, 等. 基于回路可靠性贡献指标的电网薄弱点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 54-59.
XIAO Yayuan, ZHANG Lei, LUO Yi, et al. Interval reliability evaluation and affine arithmetic of transmission network considering weather factors[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 54-59.
- [26] 李小燕, 丁明, 齐先军. 考虑天气因素的输电网可靠性区间评估及其仿射算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 8-13.
LI Xiaoyan, DING Ming, QI Xianjun. Grid weak point analysis based on loop contribution index of the reliability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 8-13.
- [27] 董新, 张波, 潘志远. 改进状态抽样法及其在含微网配电网风险评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 39-45.
DONG Xin, ZHANG Bo, PAN Zhiyuan. Improved state sampling method applied in the risk assessment of distribution network with configuration of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 39-45.

收稿日期: 2018-05-19; 修回日期: 2018-07-24

作者简介:

刘文霞(1967—), 女, 教授, 研究生导师, 主要研究方向为电力系统风险与可靠性评估、电力系统规划; E-mail: liuwenxia001@163.com

李征洲(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统风险与可靠性评估。E-mail: 965968177@qq.com

(编辑 葛艳娜)