

运行风险评价方法探索及在河南电网中的应用

随着国家电网公司对电网运行风险评估及风险管理工作的日趋常态化,迫切地需要制定风险评价指标并能够根据量化指标进行系统风险定级及风险管控。首先研究了适用于大电网运行风险评估的指标体系,并基于《电力系统安全稳定导则》和 599 号令《电力安全事故应急处置和调查处理条例》,建立系统风险概率及后果量化标准,确立系统的风险等级;在风险识别和风险评估的基础上,科学制定所辖配电网运行风险控制措施,降低风险造成后果的严重程度和风险发生的可能性,把风险控制在可接受的程度;最后采用所提出的方法对河南电网的整体风险进行定级,并且给出相应的风险防控思路及预案,从而验证方法的实用性及有效性。

雷俊哲¹ 孙 璐² 朱全胜¹ 芦晶晶² / 1. 国网河南省电力公司电力科学研究院 2. 中国电力科学研究院



雷俊哲/工程师

关键词/Keywords

输电系统·
运行风险·
风险定级·
风险管控·

随着电力系统网络规模的日益庞大,系统时刻承受着巨大的潜在风险。自 2003 年各国相继发生较大规模的大停电事故后,引起了电力学者对电网运行风险的广泛关注,并逐渐认识到确定性准则在处理电网风险的弊端,需要研究计及各种不确定影响的模型和方法来完善现有的工具^[1,2]。同时国家电网公司“十二五”规划及“三集五大”战略中明确提出对电网运行风险评估及风险管理更严格的要求。

本文研究了适用于大电网运行风险评估的指标体系及风险评价方法;根据风险发生的可能性及风险可能造成的后果提出确定电网综合风险等级的方法,对建立多维度全方位的安全风险管控机制进行了初步的探索,从而实现对电网、设备、人员、用户和环境等风险因素进行有效的风险管控工作;采用本文提出的电网风险定级方法,结合河南电

网 2013 年夏季的实际运行情况,确定河南电网整体的风险等级,并且给出相应的风险防控思路及预案,从而验证了方法的实用性及有效性。

运行风险评估

1. 运行风险评估定义

风险和可靠性是描述同一事实的两个方面,更高的风险意味着更低的可靠性,反之亦然^[3]。

在电力系统领域中,运行风险的基本定义是:对电力系统面临的不确定性因素,给出可能性与严重性的综合度量^[4]。电力系统的运行风险不仅包含正常运行方式下在较长时期内持续存在的基准风险评估,还包含由设备停运、系统试验以及设备异常等非正常方式或特定情况下一定时期内存在的基于问题的风险。运行风险的基本计算公式为^[5]

$$\text{Risk}(X_{t,f}) = \sum_{i=1}^n P(E_i) \cdot \left[\sum_{j=1}^n P(X_{t,j} | X_{t,f}) \cdot \text{Sev}(E_i, X_{t,j}) \right] \quad (1)$$

式中, $X_{t,f}$ 为 t 时刻的运行方式; $X_{t,j}$ 为第 j 个可能的负荷水平; $P(X_{t,j} | X_{t,f})$ 为 t 时刻出现 $X_{t,j}$ 负荷水平的概率; $P(E_i)$ 为第 E_i 个扰动出现的概率; $\text{Sev}(E_i, X_{t,j})$ 为在第 j 个负荷水平下第 i 个扰动发生后系统的严重程度。

2. 运行风险评估指标

常规可靠性评估主要是面向规划的长期可靠性评估,主要分为负荷点指标和系统指标两类^[6]。运行风险评估更侧重于调度实时运行评估,指标必须符合电力系统运行要求,既要表征支路潮流过负荷、母

线电压越限等运行安全约束违限指标，还要包括失负荷量等更具物理意义的指标^[7-11]。为了量化系统风险，从多个评估角度定义了一套系统级及元件级的多维度运行风险评估指标体系，体系架构如图1所示。

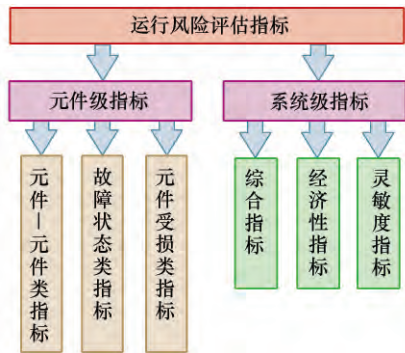


图1 运行风险评估指标体系

- 1) 元件 - 元件类指标: 某单一故障导致单一元件受损的风险值。元件受损包括支路潮流过负荷、母线电压越限及负荷点失负荷等。
 - 2) 故障类指标: 在元件 - 元件类指标基础上计算某个单一故障对系统的整体影响情况。有助于运行人员快速确定具有高概率性、高影响性以及两者皆高的故障状态，从而进行有效的风险管理。
 - 3) 元件受损类指标: 基于系统故障集得到的某个元件不满足安全约束的受损风险值，也是基于元件 - 元件类指标得到。通过该类指标可清晰得到各受损元件的受损程度及排序。
 - 4) 综合指标: 在故障类及元件受损类指标的基础上得到的系统级指标，可揭示整个系统的风险等级。主要指标为系统潮流过负荷概率及风险、系统母线电压越限概率及风险、系统失负荷概率LOLP、系统电力不足期望值EDNS以及系统电能不足期望值EENS等。
 - 5) 经济性指标: 将系统潜在风险可能造成的经济损失以及降低系统风险所需的费用进行量化，从而找到经济最优方案。
 - 6) 灵敏度类指标: 有效找到钳制系统风险的元件信息及系统的薄弱环节，为系统运行、调度和设备管理人员提供重要的参考信息。
3. 运行风险评估基本框架
- 完整的运行风险评估分为风险识别、风险分

析、风险定级和风险管控四个阶段，基本框架如图2所示。

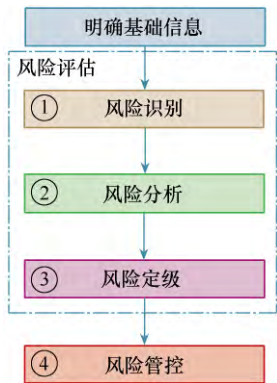


图2 运行风险评估基本框架

- 1) 风险识别: 对目标产生重大影响的风险源、影响范围、事件及其原因进行识别，确定系统的故障集。
- 2) 风险分析: 建立风险评估模型，综合风险事件发生后果及概率，得到多维度的风险指标，为风险定级建立基础。
- 3) 风险定级: 根据实际电网运行特点，设定风险等级阈值，将风险结果与预先设定的风险准则相比较，确定风险等级。
- 4) 风险管控: 根据风险结果，考虑风险管理水平，制定相应的风险控制措施，把风险降低到可接受程度。

风险定级研究

- 1. 风险值量化
- 影响电网运行风险的因素主要包括社会影响因素、损失负荷性质、设备类型及故障类别等。本文对影响电网运行风险的因素均进行量化取值，通过分析具体风险数值，判断电网存在的风险等级。
- 电网风险值是由风险可能造成的危害值及风险发生的可能性共同决定的，量化公式为
- 电网风险值 = 危害值 × 概率值 (2)
- 2. 危害值量化
- 危害值主要由危害程度、社会影响因数以及损失负荷性质因数决定，详细计算公式为
- 危害值 = 危害程度分值 × 社会影响因素 × 损失负荷或用户性质因数 (3)

599 号令^[12]强调并加强了政府对电力系统安全稳定运行的监管力度，将电网事故等级划分为特别重大、重大、较大和一般四个等级，并对各事故等级标准做出详细的界定标准。危害程度主要根据事故损失负荷情况，参照 599 号令划分等级。

社会影响因数主要考虑检修处于不同时期造成的社会影响不同，各检修时间的社会影响因数如表 1 所示。对于基准风险，社会影响因数取 1，相应的危害值计算时也不用考虑该因子项。

表 1 社会影响因数

检修时间	一般时期	特殊时期 保供电	二级保 供电	一级保 供电	特级保 供电
分值	1	1.2	1.4	1.6	2

损失负荷性质因数主要考虑损失负荷的重要程度不同所造成的危害程度不同，重要城市负荷主要指省会、经济特区和重要旅游城市负荷，如表 2 所示。

表 2 损失负荷性质因数

损失负荷或 用户性质	一般负荷	重要城市负荷	特级和一级 重要用户
分值	1	1.5 ~ 2.5	1.5 ~ 2.5

3. 概率值量化

基准风险发生概率值为

概率值 = 设备类型因数 × 故障类别因数 (4)

设备类型因数是按将电网一次设备按照其所属类型进行分类评分，设备类型因数分值如表 3 所示。同杆并架双回线长度按单回线长度考虑，若考虑不同设备类型因数时，取分值高的设备类型。

表 3 设备类型因数分值

设备	主变 变压器	母线	电缆	架空线	同杆双 回线	直流线路	发电机
分值	0.8	0.4	0.8	1	0.8	1.2	1.3

电网风险事件的故障类别一般考虑《电力系统安全稳定导则》^[13]中规定应防范的三级电网故障。各故障类别由于其发生频次不同，建议其分值范围如表 4 所示。

表 4 故障类别因数

故障类别	第一级故障	第二级故障	第三级故障
分值	0.7 ~ 1	0.3 ~ 0.6	0 ~ 0.2

风险定级理论在河南电网中的应用

1. 河南电网整体情况

河南电网是西北、华北及华中三大区域电网联网的枢纽。2013 年夏季华中 - 华北电网通过特高压联网运行，鄂豫之间通过特高压/500 kV 电磁环网运行，华中与西北电网通过一、二期灵宝换流站联网运行。2013 年夏季特高压南送 300 万 kW，西北送河南 1 100 MW，鄂豫南送 360 万 kW，河南电网总负荷为 4 700 万 kW。全省电网共 18 个供电区，主网架由 220 kV 升级为 500 kV，全省 220 kV 电网已解环为安鹤濮、焦作、新乡、豫西、郑州、开商、许漯周、平顶山、南阳和驻信电网 10 个区域分片运行。下面主要针对河南电网开展基于基准的风险评估。

2. 河南电网风险量化标准

根据 599 号令中的各级电力安全事故等级划分标准，并结合河南电网实际运行状况，将河南电网风险危害程度划分为四个等级，详细量化标准及分值范围如表 5 所示。

表 5 河南电网风险危害程度量化标准及分值

危害程度 等级	后果的严重程度	危害程度 分值
特大事故	河南省电网减供负荷 30% 以上; 郑州市电网减供负荷 60% 以上或 70% 以上供电用户停电	1 500 ~ 3 000
重大事故	河南省电网减供负荷 13% 以上 30% 以下 郑州市电网减供负荷 40% 以上 60% 以下、或者 50% 以上 70% 以下 供电用户停电 造成电网负荷 600 MW 以上的其 他设区的市电网减供负荷 60% 以上、 或者 70% 以上供电用户停电	800 ~ 1 000
较大事故	河南省电网减供负荷 10% 以上 13% 以下 郑州市电网减供负荷 20% 以上 40% 以下、或者 30% 以上 50% 以下 供电用户停电	400 ~ 600

(续)

危害程度等级	后果的严重程度	危害程度分值
较大事故	造成电网负荷 600 MW 以上的其他设区的市电网减供负荷 40% 以上 60% 以下、或者 50% 以上 70% 以下供电用户停电	400 ~ 600
	造成电网负荷 600 MW 以下的其他设区的市电网减供负荷 40% 以上、或者 50% 以上供电用户停电	
一般事故	河南省电网减供负荷 5% 以上 10% 以下	100 ~ 300
	郑州市电网减供负荷 10% 以上 20% 以下、或者 15% 以上 30% 以下供电用户停电	
	造成设区的市电网减供负荷 20% 以上 40% 以下、或者 30% 以上 50% 以下供电用户停电	
	造成电网负荷 150 MW 以上的县级市电网减供负荷 40% 以上 60% 以下、或者 50% 以上 70% 以下供电用户停电	

对于基准风险，危害值为危害程度分值和损失负荷性质因数的乘积，损失负荷性质因数如表 6 所示。

表 6 损失负荷性质因数

损失负荷或用户性质	一般负荷	重要城市负荷	特级和一级重要用户
分值	1	1.5	2

根据引起危害的概率大小，电网风险可能性分为五个等级，量化取值范围如表 7 所示。

表 7 电网风险可能性量化分值

概率等级	分值
可能性很大	1 以上
可能性较大	0.7 ~ 0.1
可能性一般	0.3 ~ 0.7
可能性较小	0.1 ~ 0.3
可能性很小	0 ~ 0.1

对于基准风险，设备类型因数分值按表 3 取值，针对较具体的不同故障类别，按表 8 进行取值。

表 8 故障类别因数取值建议

线路、主故障类别取值	变压器和发电机	同塔线路故障	直流双极闭锁	线路检修时 $N-1$	母线检修时 $N-1$
分值	1	0.7	0.6	0.4	0.2

将河南电网风险分为 I ~ VI 共六级风险，各风险等级划分标准如表 9 所示。

表 9 风险等级划分标准

风险等级	风险值范围
I 级风险	风险值 $\geq 1\ 000$
II 级风险	$500 \leq \text{风险值} < 1\ 000$
III 级风险	$100 \leq \text{风险值} < 500$
IV 级风险	$50 \leq \text{风险值} < 100$
V 级风险	$10 \leq \text{风险值} < 50$
VI 级风险	$0 \leq \text{风险值} < 10$

3. 河南电网风险定级

根据《国家电网公司安全事故调查规程》^[4]，全面梳理河南电网 2013 年夏季正常方式下的电网安全事故隐患，应用河南电网风险量化标准，得到全省内 II 级以上风险共两个，不存在 I 级风险。如表 10 所示。

表 10 II 级风险列表

序号	1	2
事件描述	开火 220 kV 并网机组故障切机	500 kV 涇仓、塔仓线及仓颉 I#、2# 主变压器任一跳闸
后果描述	祥符变电站、庄周变电站下灌均超控制极限，若考虑仅限制开封地区负荷，则开封负荷损失将超过 20%，造成一般电网事故，建议考虑同时限制开封、商丘地区负荷	濮阳电网供电能力大幅下降，需压限 45 万 kW 负荷
负荷损失比	27%	35%
危害值	450	300
危害等级	较大事故	一般事故
概率修正值	1.3	1.67
概率等级	可能性很大	可能性很大
风险值	585	501
风险等级	II 级风险	II 级风险

4. 河南电网风险控制与防范措施

针对河南电网存在风险,制定风险控制措施,实现风险的超前控制,把风险降低到可接受程度。主要控制措施包括:

1) 电网规划建设注重主网与配电网协调发展,加快完善电网结构,减少单电源、单线单变压器和串联供电方式。

2) 加强运行设备的巡视监控及电网检修的管理,加强重要电源及重要输电断面的设备运行维护,及时消除重要电源失去进而导致发生事故的隐患。

3) 加强电网稳定控制策略研究,制定有针对性的事故预控措施。加强电网运行风险分析和预警预控,防范因方式安排不当、计划安排不周等造成的停电事故。

4) 针对Ⅲ级及以上风险进行分析,确定重点监督厂站和线路。

结束语

提出了电力系统运行风险的指标体系及风险定级的方法,在风险识别和风险评估的基础上,为科学制定风险管控措施,降低电网风险指标提供了借鉴指导,主要结论如下:

1) 制定了一套负荷系统运行要求的、更具物理意义的和多维度的运行风险评估指标体系。

2) 基于《电力系统安全稳定导则》和《电力安全事故应急处置和调查处理条例》建立风险概率及后果的量化标准,研究系统风险定级的方法。

3) 以河南电网2013年夏季运行方式为例,采用本文方法确定系统风险等级,给出相应的风险管控思路及预案。

4) 限于篇幅,本文研究仅限于基准风险评估,可将本文的研究思路推广到基于设备停运、系统试验或设备异常等非正常方式下的基于问题的风险评价中。

参考文献

[1] Ivey, Akhila, Robinson. Grid of the future: white-pa-

per on accommodating uncertainty in planning and operations [R]. Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 1999.

[2] Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations [R]. U. S. - Canada Power System Outage Task Force, 2004.

[3] 李文沅. 电力系统风险评估—模型、方法和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[4] McCalley J D, Vittal V, Abi-Samra N. An overview of risk based security assessment [C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Alberta, Canada, 1999.

[5] 吴文传, 宁辽逸, 张伯明, 等. 电力系统在线运行风险评估与决策 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24 (2): 28-34.

[6] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1986.

[7] 孙元章. 电力系统运行可靠性理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[8] Armando M, Leite S, Leonidas Chaves de Resende, et al. Well-being analysis for composite generation and transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (4): 1763-1770.

[9] Wangdee W, Billinton R. Bulk electric system well-being analysis using sequential Monte Carlo simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (1): 188-193.

[10] Leite da Silva A M, de Resende L C, da Fonseca Manso L A, et al. Well-being analysis for composite generation and transmission systems based on pattern recognition techniques [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2 (2): 202-208.

[11] Amaral T S, Borges C L T, Rei A M. Composite system well-being evaluation based on non-sequential Monte Carlo simulation [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80 (1): 37-45.

[12] 电力安全事故应急处置和调查处理条例 [S]. 2011.

[13] DL 755—2001 电力系统安全稳定导则 [S]. 2001.

[14] 国家电网公司安全事故调查规程 [S]. 2011.

(收稿日期: 2014-01-05) EA