

基于故障树理论的电网调度操作实时风险评估

林少华¹,刘嘉宁¹,陈东¹,贾宏杰²,曾沅²,王丙东²,王恩²,刘哲²

(1. 广东电网电力调度控制中心,广东 广州 510699;2. 天津大学 电气与自动化工程学院,天津 300072)

摘要: 将风险理论引入到电网调度操作中,提出一种针对调度操作的实时风险评估方法。该方法利用故障树原理模拟调度操作执行过程,采用状态枚举方法分析操作风险状态,来计算执行调度操作给电网带来的影响。建立实用化调度操作风险指标体系。IEEE-RTS 测试系统结果表明,所提操作风险评估方法能够为每一步操作关联风险指标,辅助操作人员提前制定风险预控措施。

关键词: 电力系统;故障树;调度操作;风险;设备故障;评估

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.019

0 引言

为了保证电网安全、可靠运行,调度员需采取合理的调度操作。目前调度员主要依据电网实时运行数据和个人经验对电网进行操作。调度操作指令票从拟定到最终执行有着一套较为完整的操作流程与控制方法,很大程度上保证了电力调度的安全性。但考虑到操作执行过程中恶劣天气、设备故障以及误操作等不确定因素,调度操作可能无法正常执行,影响系统安全稳定运行。深圳 4.10 大停电事故的直接原因就是一个 500 kV 变电站在倒闸操作过程中开关发生故障导致设备连锁跳闸^[1-2]。量化分析调度操作过程中各种不确定因素给电网带来的影响意义重大。

风险评估不仅能够量化事故自身给电网安全运行带来的后果,同时又能考虑到不确定因素对电网的影响,因此在电网规划与运行中得到了广泛的应用^[3-6]。文献[7-9]将风险理论应用到电力系统暂态稳定的评估中,提出了元件故障概率和风险后果的暂态稳定风险评估模型和方法。文献[10-12]研究了电力系统静态风险评估方法,包括电压稳定和负荷削减等。文献[13]提出了一种在线风险评估方法(OLRBSA),应用概率模型评估系统当前和未来的运行风险。

电网调度作为电力企业日常工作之一,其目的是对电网元件的实时操作。目前的电网调度操作系统已经能够实现对操作票的自动生成-校核-发布功能^[14-16]。文献[17-18]从工程实际出发分析了电网调度操作过程中存在的危险点,并提出了相应的风险

管控措施;文献[19-20]研究了智能调度操作系统,开发了能够对调度操作各环节进行智能校核的实际应用软件,可以有效预防调度误操作。目前对调度操作的研究主要集中于确定性的安全校核,而忽视了调度操作过程中可能存在的潜在风险。

本文从调度操作成功、失败 2 个方面出发,在多维不确定因素下分析了调度操作对电网风险的影响。利用故障树原理为调度过程中的每一步操作关联量化风险指标,使调度人员能够事先更加清晰地掌握调度操作将面临何等风险。最后利用 IEEE-RTS 测试系统验证本文所提方法的有效性。

1 调度操作风险来源分析模型

调度操作的风险主要来自 3 个方面:第一,元件自身故障导致操作失败,给系统带来风险;第二,调度操作成功后,系统自身存在的风险;第三,调度操作成功后,由于系统可靠性降低,发生相应的发展故障给系统带来风险。本文以调度操作风险作为顶端事件,利用故障树原理解释调度操作风险来源,如图 1 所示,图中 $F_1, F_2, \dots, F_k$ 为操作成功后的 k 个发展故障; $C_1, C_2, \dots, C_m$ 为导致操作失败的 m 个元件故障; N 代表操作成功执行。

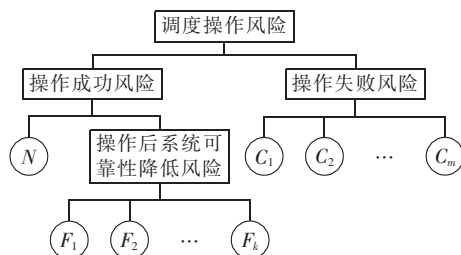


图 1 调度操作风险来源故障树模型

Fig.1 Fault tree model of dispatch risk source

树中每个基本事件都代表一种操作风险来源并对应着一种操作风险状态,因此图中所示模型即把调度操作风险转换为一系列与操作相关的操作风险状态风险。假设对元件 e_i 进行某调度操作,相应的

收稿日期:2013-05-03;修回日期:2014-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277128);广东电网调度操作安全风险量化评估模型研究及实用系统建设研究项目
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277128) and Program of Dispatching Operation Security Risk Quantitative Assessment Model for Guangdong Power Grid and Its Practical Software Construction

操作风险状态定义如下。

a. 操作失败状态集 S_f 。

通过对调度历史数据统计分析,得到导致操作失败的元件故障集合 $C(e_i)$,如式(1)所示:

$$C(e_i) = \{C_{e_i}^1, C_{e_i}^2, \dots, C_{e_i}^m\} \quad (1)$$

其中, $C_{e_i}^m$ 为第 m 个导致元件 e_i 操作失败的元件故障。

集合 $C(e_i)$ 中 m 个元件故障导致元件 e_i 操作失败后的系统状态集定义为元件 e_i 操作失败状态集 $S_f(e_i)$:

$$S_f(e_i) = \{S(C_{e_i}^1), S(C_{e_i}^2), \dots, S(C_{e_i}^m)\} \quad (2)$$

其中, $S(C_{e_i}^m)$ 为第 m 个元件故障 $C_{e_i}^m$ 导致元件 e_i 操作失败后的系统状态。

b. 操作成功发展状态集 S_d 。

定义某故障 F 与元件 e_i 的关联度如下:

$$\delta_{\text{con}}(e_i, F) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\delta_{\text{con}}(e_i, F) = 1$ 表示对元件 e_i 成功操作后,故障 F 发生会给系统造成重大后果,其数值可根据故障 F 后果确定。

假设 $\xi(F)$ 代表故障 F 发生后给系统造成的后果, ξ_0 代表设定的后果截断值, $d(\pm e_i)$ 代表对元件 e_i 操作成功,按如下逻辑关系确定 $\delta_{\text{con}}(e_i, F)$ 值:对于故障 F ,如果 $\xi(F) > \xi_0$ 有且只有一个前提条件 $d(\pm e_i)$,则 $\delta_{\text{con}}(e_i, F) = 1$;否则 $\delta_{\text{con}}(e_i, F) = 0$ 。

所有与元件 e_i 关联度为 1 的故障组成了元件 e_i 操作成功后的发展故障集 $F(e_i)$:

$$F(e_i) = \{F_{e_i}^1, F_{e_i}^2, \dots, F_{e_i}^k\} \quad (4)$$

其中,故障 $F_{e_i}^k$ 称为元件 e_i 操作成功后的第 k 个发展故障。则元件 e_i 操作成功后发展状态集 $S_d(e_i)$ 如式(5)所示:

$$S_d(e_i) = \{S(F_{e_i}^1), S(F_{e_i}^2), \dots, S(F_{e_i}^k)\} \quad (5)$$

其中, $S(F_{e_i}^k)$ 为第 k 个发展故障 $F_{e_i}^k$ 发生后的系统状态。

c. 操作成功状态 S_n 。

操作成功即操作正常执行,则对元件 e_i 操作成功后的系统状态即为操作成功状态 $S_n(e_i)$ 。

通过对操作风险来源进行分析,将元件 e_i 的操作风险转换成上述 3 种操作风险状态下的风险,其中操作成功状态 S_n 和操作失败状态集 S_f 属于实时操作风险状态,即操作执行过程中直接给系统带来影响的风险状态;操作成功发展状态集 S_d 属于延时操作风险状态,即在操作执行之后的一段时间内给系统带来影响的风险状态。操作风险组成示意图如图 2 所示,图中, t_1 为操作的开始时间; t_2 为操作执行完毕时间; t_3 为下一个操作开始时间; $R(e_i)$ 为本次操作的总风险; $R(S_n(e_i))$ 、 $R(S_f(e_i))$ 和 $R(S_d(e_i))$ 分别为来自操作成功状态集、操作失败状态集和操作成功发展状态的风险。

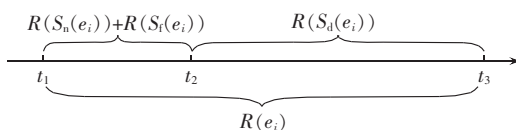


图 2 操作风险组成

Fig.2 Components of operational risk

2 调度操作风险指标计算

本文操作风险指标包括:节点电压越限指标 R_U 、支路潮流过载指标 R_0 和负荷损失指标 R_L ,其计算方法如下。

2.1 操作风险状态概率计算

操作风险状态分为实时操作风险状态和延时操作风险状态,以下为相应风险状态发生概率计算公式。

a. 实时操作风险状态集 S_n 和 S_f 发生概率:

$$\begin{aligned} P(S_n) &= P(N) \\ P(S_{f,h}) &= P(C_h|F)P(F) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $P(S_n)$ 和 $P(S_{f,h})$ 分别为操作成功状态 S_n 和第 h 个操作失败状态发生的概率; $P(N)$ 和 $P(F)$ 分别为本操作执行成功和操作失败的概率; $P(C_h|F)$ 为在本操作执行失败条件下元件故障 C_h 发生的概率。

b. 延时操作风险状态集 S_d 发生概率:

$$P(S_{d,j}) = P(F_j|N)P(N) \quad (7)$$

其中, $P(S_{d,j})$ 为第 j 个操作成功发展状态发生的概率; $P(F_j|N)$ 为在本操作执行成功条件下第 j 个操作成功发展故障 F_j 发生的概率。

2.2 操作风险后果计算

a. 电压越限风险后果 I_U 。

电压越限风险后果用来反映节点电压超出可接受范围的严重程度,如式(8)所示:

$$I_U = \sum_{i=1}^n g(U_i) \quad (8)$$

其中, n 为出现电压越限的节点数; $g(U_i)$ 为节点电压越限严重度函数,如图 3 所示,图中 $U_{l,i}$ 和 $U_{u,i}$ 分别为节点 i 可以接受的电压下限和上限数值。

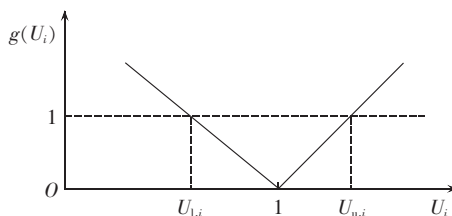


图 3 电压越限严重度函数

Fig.3 Severity function of voltage limit violation

b. 支路潮流过载风险后果 I_0 。

支路潮流过载风险后果用来反映支路过载严重程度,如式(9)所示:

$$I_0 = \sum_{i=1}^s K(S_i) \frac{S_i - S_{r,i}}{S_{r,i}} \quad (9)$$

$$K(S_i)=\begin{cases}1 & S_i>S_{r,i} \\ 0 & S_i\leq S_{r,i}\end{cases}\quad (10)$$

其中, s 为发生潮流过载的支路数; S_i 为支路 i 的实际输送功率; $S_{r,i}$ 为支路 i 的功率输送极限; $K(S_i)$ 为阶跃函数。

c. 负荷损失风险后果 I_{L_0} 。

电网发生故障时,由于继电保护或人为控制,会切除一部分负荷,负荷损失后果如式(11)所示:

$$I_L=\sum_{i=1}^v\alpha_iL_i\quad (11)$$

其中, v 为出现负荷削减的节点数; L_i 为第 i 个负荷削减节点的负荷削减量; α_i 为第 i 个负荷削减节点相应负荷的重要性系数,可根据负荷等级确定。

调度操作风险指标 R 计算公式为:

$$R=\sum_{h=1}^mP(S_{f,h})I(C_h)+P(S_n)I(N)+\sum_{j=1}^kP(S_{d,j})I(F_j)\quad (12)$$

其中, $I(C_h)$ 、 $I(N)$ 和 $I(F_j)$ 分别为第 h 个操作失败状态、操作成功状态和第 j 个操作成功发展状态的风险后果,分别对应上述 3 种风险后果。

3 调度操作风险评估框架

调度操作风险评估框架如图 4 所示,主要包括 1 个内部存储器 and 2 个计算功能模块。

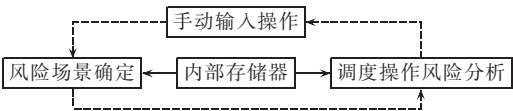


图 4 操作风险分析框架
Fig.4 Frame of operational risk analysis

内部存储器主要存储:系统网络数据,包括线路、主变参数以及节点注入功率等;各种操作的操作风险来源和操作风险状态发生概率数据。

风险场景确定模块:此模块依据操作人员的调度操作指令确定风险场景,从实时数据库中读取网络基本数据和操作风险来源数据,形成关于本操作的风险来源状态集。调度操作风险分析模块:此模块根据所形成的风险分析场景,通过网络拓扑分析和潮流计算得到风险后果,结合从数据库中读取的操作概率数据,计算调度操作风险指标,并反馈给操作人员以供参考。

4 算例分析

利用 IEEE-RTS 测试系统验证本文所提方法,系统单线图如图 5 所示^[21]。

通过对广东电网历史数据的分析,可设调度操作成功概率为 0.98,则操作失败概率为 0.02。开关与刀闸自身故障导致操作失败概率如表 1 所示。

以综合调度令为例,假设由于某些原因线路

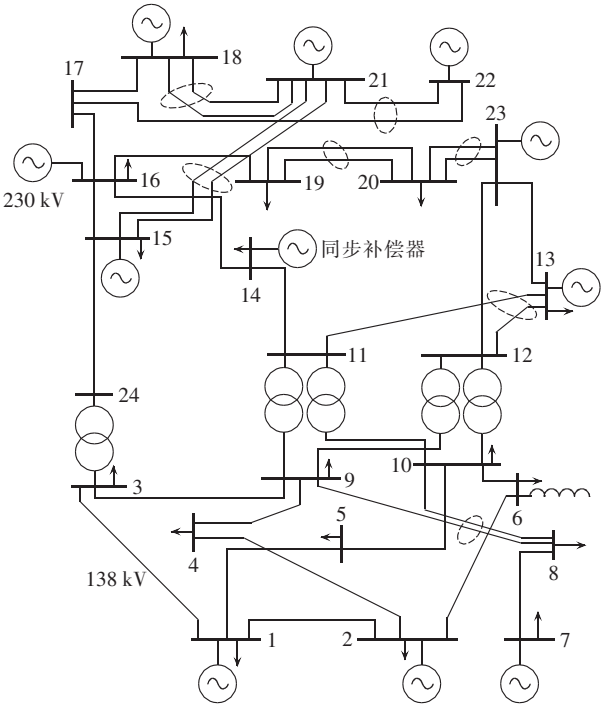


图 5 IEEE-RTS 系统单线图
Fig.5 Single line diagram of IEEE-RTS system

表 1 开关刀闸操作故障概率
Tab.1 Fault probability of isolators and switches

设备	故障种类	发生概率
开关	开关爆炸	0.02
	机械故障导致拒动	0.63
	开关拒动且闭锁	0.35
刀闸	刀闸瓷瓶断裂	0.01
	机械故障导致拒动	0.99

15-24 需由运行转冷备用,利用第 2 节所提的调度操作风险方法对该操作进行风险计算,得到风险指标 $R_U=27.56$, $R_0=14.36$, $R_L=1.23$,可见电压越限风险较大,因此需提醒调度员在执行操作时应提前制定电压预控措施。

4.1 操作过程中每一步风险分析

根据网络拓扑结构综合令可分解成为单项令,如表 2 所示。各步操作风险计算结果如表 3 所示。

由于第 3 步和第 5 步断开线路侧刀闸属于不带电操作,不存在操作风险,操作风险主要集中于开关与母线侧刀闸操作。对于电压越限风险指标 R_U 和支

表 2 综合令操作具体步骤(单项令)
Tab.2 Operational steps of comprehensive order(single orders)

操作步骤	操作内容
1	断开母线 15 侧开关
2	断开母线 24 侧开关
3	拉开母线 15 线路侧刀闸
4	拉开母线 15 母线侧刀闸
5	拉开母线 24 线路侧刀闸
6	拉开母线 24 母线侧刀闸

表 3 操作中各步操作风险
Tab.3 Risk of each operational step

操作步骤	R_U	R_O	R_L
1	7.69	4.09	0.82
2	6.09	3.09	0
3	0	0	0
4	7.69	4.09	0.41
5	0	0	0
6	6.09	3.09	0
总指标	27.56	14.36	1.23

路过载风险指标 R_O ,第 1 步与第 4 步风险水平略大于第 2 步与第 6 步。第 1 步发生开关爆炸与第 4 步发生刀闸瓷瓶断裂都会导致母线 15 失压,而第 2 步开关爆炸与第 6 步刀闸瓷瓶断裂会导致母线 24 失压。母线失压会自动切除与其相连所有设备,从图 5 可知母线 15 失压切除设备多于母线 24,对潮流影响会更大,因此第 1、4 步风险水平略高。对于负荷削减风险指标 R_L ,第 1、4 步存在负荷削减风险,而第 2、6 步不存在负荷削减风险。由图 5 可知母线 15 连有负荷而母线 24 没有负荷,因此第 1、4 步导致母线 15 失压会造成负荷削减。因此整个调度操作过程中,更需要注意第 1、4 步的风险防范,有助于系统安全稳定运行。

4.2 操作风险来源分析

根据第 1 节分析可知,调度操作风险来源主要由操作失败、操作成功执行和操作成功后发展状态 3 个部分组成。针对线路 15-24 由运行转冷备用操作,表 4 为 3 种不同风险来源在总风险指标中所占数值。

表 4 操作风险来源分析
Tab.4 Analysis of operational risk source

风险来源	R_U	R_O	R_L
操作失败	2.02	0.88	1.23
操作成功	25.02	13.08	0
发展状态	0.52	0.40	0
总指标	27.56	14.36	1.23

从表中可以看出,电压和潮流越限风险主要来源于操作正常状态,即正常操作后系统自身存在较高风险,而负荷削减只来源于操作失败。事实上,操作失败和操作成功后发展状态对系统造成的电压越限与支路过载后果大于操作成功情况,但是其发生概率相对较小,因此在总指标中所占比例较少。对于负荷削减风险指标,只有在操作失败极端情况下造成母线失压,才会导致负荷削减,因此负荷削减只来源于操作失败。

4.3 不同调度操作风险分析

假设线路 12-23、线路 15-24 以及主变 11-9 都执行由运行转冷备用操作,3 个操作风险指标如表 5 所示。

表 5 3 种操作风险比较
Tab.5 Comparison of three operational risks

操作设备	R_U	R_O	R_L
线路 12-23	19.93	12.54	0
线路 15-24	27.56	14.36	1.23
主变 11-9	22.08	11.01	2.10

从表 5 中可以看出,对于电压和潮流越限风险指标,对线路 15-24 的操作要大于对线路 12-23 和主变 11-9 的操作。对于负荷削减风险指标,对主变 11-9 的操作风险最大。由于每种调度操作的风险水平不同,调度决策部门可以安排工作经验相对丰富的操作人员进行高风险操作,有助于合理人员配置,同时也提高了调度操作的效率。

5 结语

本文将风险评估方法引入到调度操作中,提出了一种基于故障树理论的调度操作风险分析模型。该模型同时考虑到调度操作成功与失败 2 种情况对电网所造成的影响,能够在调度操作执行之前对操作风险进行量化分析。考虑多维不确定因素影响下电网调度操作所面临的风险,指导调度操作人员提前制定相应风险预控措施,同时有助于调度决策部门合理进行人员配置。本文所采用的概率数据是基于历史数据得到,因此实时修订的概率数据模型将是今后工作的重点。

参考文献:

[1] 占勇,程浩忠,熊虎岗. 电力网络连锁故障研究综述[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):93-98.
ZHAN Yong,CHENG Haozhong,XIONG Hugang. Review of cascading failures in electric power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(9):93-98.

[2] 吴文可,文福拴,薛禹胜,等. 基于马尔可夫链的电力系统连锁故障预测[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):29-37.
WU Wenke,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. A Markov chain based model for forecasting power system cascading failures[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(5):29-37.

[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,2006:115-159.

[4] 刘铠滢,蔡述涛,张尧. 基于风险评判的电网规划方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(22):69-73.
LIU Kaiying,CAI Shutao,ZHANG Yao. The power network planning method based on risk evaluation[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(22):69-73.

[5] 吴子美,刘东,周韩. 基于风险的电力系统安全预警的预防性控制决策分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):105-109.
WU Zimei,LIU Dong,ZHOU Han. Preventive control decision making based on risk analysis for power system security warning[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):105-109.

[6] 冯永清,张伯明,吴文传,等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估(一)运行风险的提出与发展[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):17-23.
FENG Yongqing,ZHANG Boming,WU Wenchuan,et al. Power

- system operation risk assessment based on credibility theory part one propound and development of operation risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(1):17-23.
- [7] VITTAL V,MCCALLEY J D,van ACKER V. Transient instability risk assessment[C]//Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton,Canada:[s.n.],1999:206-211.
- [8] 王伟,毛安家. 市场条件下电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报,2009,29(1):68-73.
- WANG Wei,MAO Anjia. Risk assessment of power system transient security under market condition[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(1):68-73.
- [9] 刘新东,江全元,曹一家,等. 基于风险理论和模糊推理的电力系统暂态安全风险评估[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):15-20.
- LIU Xindong,JIANG Quanyuan,CAO Yijia,et al. Transient security risk assessment of power system based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):15-20.
- [10] WAN Hua,MCCALLEY J D,VITTAL V. Risk based voltage security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems,2000,15(4):1247-1254.
- [11] 吴文传,宁辽逸,张伯明,等. 一种考虑二次设备模型的在线静态运行风险评估方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):1-5,14.
- WU Wenchuan,NING Liaoyi,ZHANG Boming,et al. Online operation risk assessment for power system static security considering secondary devices models[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(7):1-5,14.
- [12] 唐朝,卢继平,汪洋,等. 基于风险的低压切负荷量的确定方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(23):4-8.
- TANG Chao,LU Jiping,WANG Yang,et al. Risk based determination of under voltage load shedding amount[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(23):4-8.
- [13] NI Ming,MCCALLEY J D,VITTAL V. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(1):258-265.
- [14] 艾琳,华栋. 电力系统智能型调度[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):83-87.
- AI Lin,HUA Dong. Power system intelligent dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):83-87.
- [15] 徐俊杰,许先锋,杜红卫,等. 电网智能操作票管理系统[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):98-101.
- XU Junjie,XU Xianfeng,DU Hongwei,et al. Intelligent operation order management system of power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):98-101.
- [16] 许巧燕,尤钟晓. 智能化调度操作票系统的实现[J]. 电力自动化设备,2000,20(4):31-36.
- XU Qiaoyan,YOU Zhongxiao. An implementation method for power system fault diagnosis expert system[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(4):31-36.
- [17] 花关柱. 浅谈电力调度操作危险点分析及预控[J]. 电力技术,2010,19(15-16):63-68.
- [18] 彭磊,孟敬伟,宁云华. 调度操作安全预控技术探讨[J]. 电工技术,2011,3:3-34.
- [19] 王文林,洪天忻. 新型调度操作票系统防误技术研究与应用[J]. 电网技术,2006,30(增刊):579-582.
- WANG Wenlin,HONG Tianxin. New adjust operation ticket system defends the mistake technical research and application[J]. Power System Technology,2006,30(Supplement):579-582.
- [20] 高明,陈珂宁,李文云. 云南电网调度操作安全风险防控系统的研究与设计[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):129-133,138.
- GAO Ming,CHEN Kening,LI Wenyun. Security risk prevention and control system for dispatch operations of Yunnan power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):129-133,138.
- [21] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1979,98(6):2047-2053.

作者简介:



林少华

林少华(1970-),男,广东广州人,高级工程师,主要从事电网调度运行及管理工作(E-mail:lyf_guangdong@163.com);

刘嘉宁(1974-),男,广东台山人,高级工程师,主要从事电网调度运行及管理工作(E-mail:ljn_guangdong@163.com);

贾宏杰(1973-),男,天津人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、新能源发电与综合能源系统(E-mail:hjjia@tju.edu.cn)。

Real-time risk assessment based on fault tree theory for power dispatch

LIN Shaohua¹,LIU Jianing¹,CHEN Dong¹,JIA Hongjie²,ZENG Yuan²,

WANG Bingdong²,WANG En²,LIU Zhe²

(1. Dispatching and Control Center,Guangdong Power Grid,Guangzhou 510699,China;

2. School of Electrical Engineering and Automation,Tianjin University,Tianjin 300072,China)

Abstract: A real-time risk assessment method is proposed for the operations of power dispatch,which, based on the risk theory, applies the fault tree principle to simulate the operational process of power dispatch and adopts the state enumeration method to analyze its risk state and estimate its impact on power grid. A practical risk index system is built. The results of IEEE-RTS test system show that, the proposed method associates each operational step with a risk index to help operators take precontrol measures.

Key words: electric power systems; fault tree; dispatch operation; risks; device failure; assessment