

使用故障树理论对电网调度自动化系统应急预案完备度的 量化分析

高明, 李文云, 袁德君, 蒋亚坤, 马玲

(云南电力调度中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 针对电网调度自动化系统应急预案研究了如何对其完备度进行分析与评价的问题。根据上级部门发布的应急预案编制导则, 使用了故障树分析法(FTA)建立了标准故障树, 通过该标准故障树与应急预案的比对, 找出了应急预案缺失的基本事件, 再根据这些基本事件对预案完备度进行了量化分析。给出了一个标准故障树实例, 利用该故障树对某一应急预案找出了缺失基本事件集, 并对该预案进行了完备度量分析。对在完备度评价过程中反映出的问题进行了探讨。

关键词: FTA; 应急预案; 基本事件; 完备度; 量化分析

Completeness degree quantitative analysis of dispatching automation system emergency preplan based on FTA

GAO Ming, LI Wen-yun, YUAN De-jun, JIANG Ya-kun, MA Ling

(Yunnan Electric Power Dispatching Center, Kunming 650011, China)

Abstract: The problem of how to analyse and evaluate the completeness degree of the dispatching automation system emergency preplan is studied. According to the compilation guide published by higher departments, FTA is used in this paper to establish the standard fault tree of the dispatching automation system emergency preplan, and the missing basic events are found out by means of comparison between the fault tree and the emergency preplan, then completeness degree quantitative analysis is given based on it. An example of a fault tree is given, a set of missing basic events is found by the fault tree according to an emergency preplan, and the completeness degree of the preplan is analyzed. Finally the problems reflected in this process are discussed.

Key words: FTA; emergency preplan; basic events; completeness degree; quantitative analysis

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0058-06

0 引言

现有调度自动化系统应急预案大多缺少科学方法的支撑,因预案难用而束之高阁的现象普遍存在,针对调度自动化系统应急预案完备度这一问题进行量化分析评价更鲜见研究。

应急预案完备度对应急处理具有重要影响。面对待评价预案集,需对如下问题做出回答:预案是否完备?有多完备?哪些地方应予完善?预案修订人员对上述问题往往无法回答,其原因在于目前对预案的评价多来自主观感觉,预案完备在哪,不完备在哪不容易讲得清楚,而这又直接导致了对预案进行科学评价和有针对性的完善修订这一工作开展困难,预案制定或修订者也对其存在一定畏难情绪。

相关学者高度重视应急预案的完备性研究^[1-3],

并指出完备性已成为制定或修订预案的一个重要参考评价准则^[2]。文献[3]指出需建立应急救援预案检查表对完备性进行检查,但研究未涉及到定量评价方法。文献[4-5]等类似文献采用故障树分析方法对不同系统进行了安全分析,为本文所提雷同问题进行了有效探索。文献[2]利用已有成果,将故障树分析法应用于自然灾害类应急预案的完备性评价,对本文的研究具有借鉴意义。

本文使用故障树分析理论对待评价预案进行了完备度量分析,并对在评价过程中反映出的问题进行了探讨,其研究价值有两方面。①建立了针对调度自动化系统的应急预案标准故障树,该故障树可供同质问题使用和参考。②根据故障树找出了缺失基本事件,并进行了预案完备度量计算,其作用在于:对调度自动化系统应急预案的修订提供了

评价标准和具体做法, 该标准和做法对类似问题有一定参考价值。

1 建立标准故障树

1.1 故障树分析法简介

故障树分析法 (Fault Tree Analysis, FTA) 是一种分析评价复杂系统可靠性的有效方法。故障树是一种树状逻辑因果关系图, 它用规定的事件、逻辑门和其他符号描述系统中各种事件之间的因果关系。FTA 已形成了完整的理论体系, 从宇航、核能进入了电子、电力、化工及交通等领域。

通常采用的建立故障树的方法是演绎法。先选定系统中不希望发生的故障事件为顶端事件, 再去寻找所有引起顶端事件的直接原因, 循此方法逐级向下寻找和演绎, 一直寻找到引起系统顶端事件发生的全部原因 (基本事件), 最终形成了使用逻辑门将各级事件相连接的一棵以顶端事件为根, 中间事件为节, 基本事件为叶的倒置故障树^[4]。本文中涉及的故障树中的主要的构图元素如表 1 所示。

表 1 故障树的主要符号

Tab.1 Main signs in fault tree

符号	名称与定义
	顶上事件: 需继续向下拆分的事件
	中间事件: 指除顶事件和基本事件以外的所有事件
	基本事件: 无需继续再向下分析的事件
	条件事件: 描述逻辑门起作用的具体事件
	与门: 表示仅当所有输入事件发生时, 输出事件才发生
	或门: 表示至少一个输入事件发生时, 输出事件就发生

1.2 建立故障树

故障树的建立是 FTA 中的重要内容。目前, 国内针对调度自动化系统应急预案建立的故障树尚未见到文献报道。首先需明确的是, 本文的研究目的是对应急预案的完备性进行评价, 故障树的顶上事件应该是我们不愿意发生的事情, 故而, 顶上事件确定为“应急预案不完备”。

如何对故障树向下分析是下一步要解决的问题。为保证分析正确而权威, 应该收集应急预案相关的法律法规、研究深入的应急救援程序和被公认为成熟完备的本行业应急预案, 据其建立标准故障树^[2]。本文认为除此之外, 另有一条实用可行的方法: 根据上级部门发布的应急预案编制导则等权威性制度或文件建立标准故障树, 其优点在于: ①将应急预案的制定与评价纳入到本行业本单位的应急预案制定与管理体系当中, 避免脱离体系另起炉灶;

②便于上级部门对下级部门应急预案进行检查与评价。

本文针对预案应急对象, 根据《某电网公司突发事件应急预案编制指南》^[6], 将故障树最顶上事件向下寻找到 7 个主要的中间事件 (即直接原因): 未进行应急准备、未进行监测与预警、未进行应急响应、未进行后期处置、未进行应急保障、未进行培训和演练及未明确预案附则内容, 其标准故障树如图 1 所示。这 7 个主要中间事件的标准故障树如图 2 到图 8 所示, 故障树符号与故障树事件对应关系及相应权重如表 2 所示。

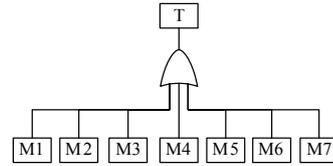


图 1 第一层组织结构

Fig.1 Organization structure of first layer

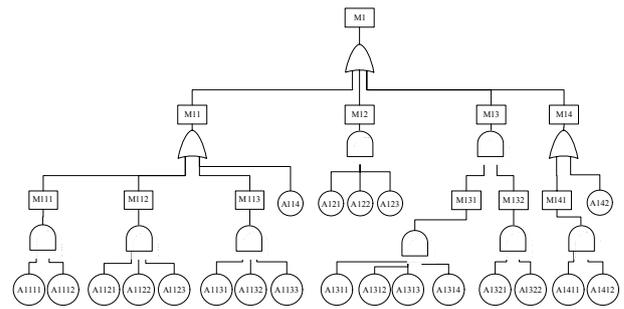


图 2 M1 组织结构

Fig.2 Organization structure of M1

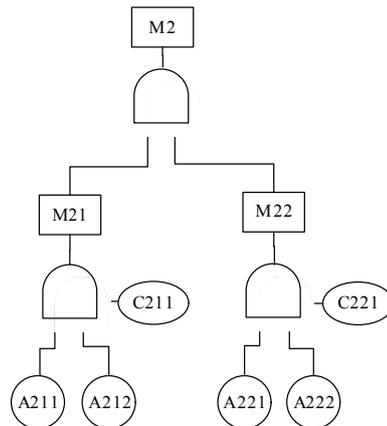


图 3 M2 组织结构

Fig.3 Organization structure of M2

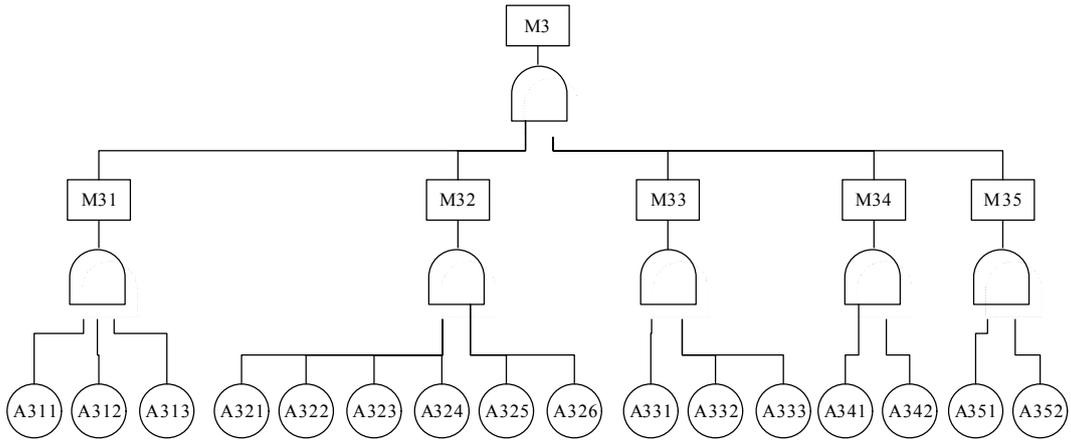


图 4 M3 组织结构

Fig.4 Organization structure of M3

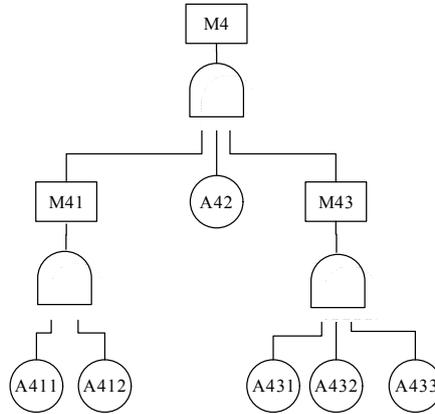


图 5 M4 组织结构

Fig.5 Organization structure of M4

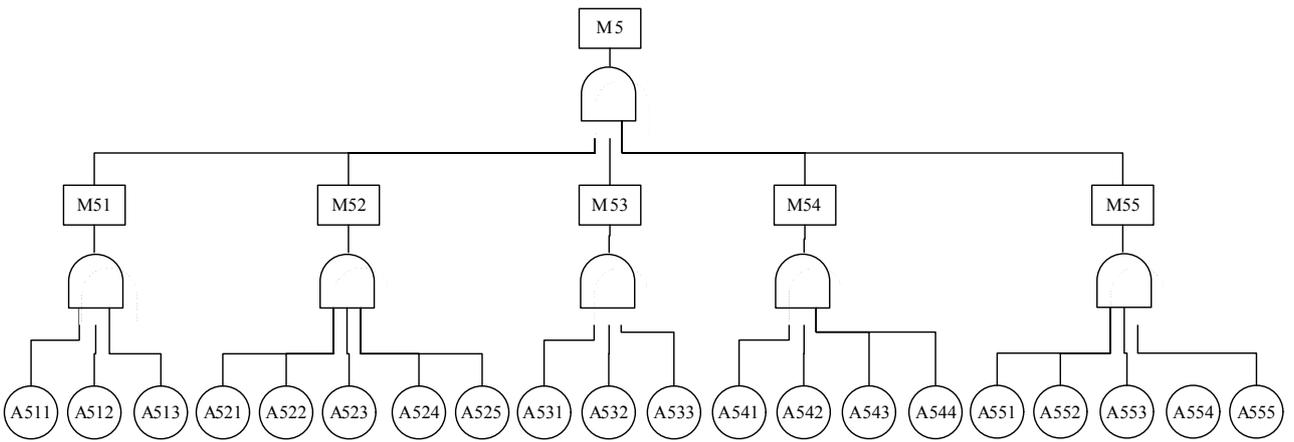


图 6 M5 组织结构

Fig.6 Organization structure of M5

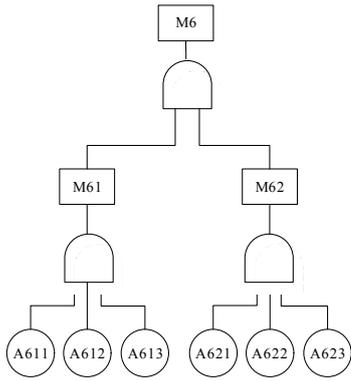


图 7 M6 组织结构
Fig.7 Organization structure of M6

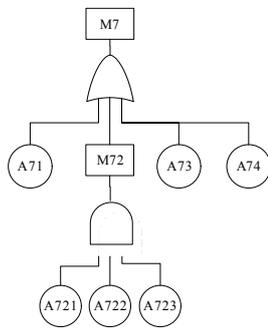


图 8 M7 组织结构
Fig.8 Organization structure of M7

2 基本事件权重

基本事件对顶上事件发生的影响程度不同, 应计算出各基本事件的权重。计算底部基本事件的权重和安全分析的主要方法有事故隐患分析法、结构重要度分级法、概率重要度分级法, 加权结构重要度分析法^[5]等。注意到目前关于电网调度自动化系统应急预案的实施记录及统计分析数据相当缺乏, 使用概率统计的各种方法难以应用, 比较可行的是结构重要度分级法。文献[2]出于相同考虑, 提出用式(1)计算权重, 即为了准确地表示各基本事件的重要程度, 从故障树的结构方面来确定各事件权重, 从顶上事件开始, 逐层计算, 直至所有事件的权重计算完毕为止。这一方法为本文所采纳, 计算后各基本事件的结构权重见表 2。

$$p(e_i) = \begin{cases} 1, & e_i \text{ 为顶上事件} \\ p(e_j), & e_i \text{ 不是顶上事件, 逻辑关系为“或”} \\ \frac{1}{t} \times p(e_j), & e_i \text{ 不是顶上事件, 逻辑关系为“与”} \end{cases} \quad (1)$$

其中: 事件 e_j 是 e_i 的直接上层事件; t 是事件 e_j 的直接子事件的数量; $p(e_i)$ 是 e_i 的权重。

表 2 符号与事件对应关系及其权重

Tab.2 Corresponding relationship between signs and events and their weights

符号	基本事件	P	符号	基本事件	P
T	应急预案不完备	1	M34	未宣布应急结束	0.2
M1	未明确总则与进行总体分析	1	A341	未说明应急结束的条件	0.1
M11	未明确预案总则	1	A342	未说明宣布应急结束的程序	0.1
M111	未说明预案编制的目的和作用	1	M35	未说明信息发布流程	0.2
A1111	未说明预案编制目的	0.5	A351	未说明信息对外发布的责任机构	0.1
A1112	未说明预案编制作用	0.5	A352	未说明信息对外发布的原则	0.1
M112	未明确编制依据	1	M4	未进行后期处置	1
A1121	未列出预案编制所依据的法律法规	0.33	M41	未说明恢复生产	0.33
A1122	未列出预案编制所依据的技术规范标准	0.33	A411	未说明事件影响消除的原则和内容	0.165
A1123	未列出上级部门的相关应急预案规定	0.33	A412	未说明生产秩序恢复的原则和内容	0.165
M113	未明确适用范围	1	A42	未说明事件调查的原则和内容	0.33
A1131	未说明预案适用的突发事件类型	0.33	M43	未说明对预案及其应急救援处置过程的总结及改进	0.33
A1132	未说明预案级别	0.33	A431	未说明评价要求	0.11
A1133	未说明预案启动的条件	0.33	A432	未说明总结要求	0.11
A114	未说明处置原则	1	A433	未说明改进要求	0.11
M12	未说明与其他预案的关系	1	M5	未进行应急保障	1
A121	未说明预案在本单位预案体系中的位置	0.33	M51	未说明应急队伍	0.2
A122	未说明与上下级预案的衔接	0.33	A511	未说明预案的应急抢险队伍	0.067

续表 2

A123	未说明与政府有关预案的关系	0.33	A512	未说明应急专家队伍	0.067
M13	未进行危险与资源分析	1	A513	未说明社会救援资源的准备情况	0.067
M131	未进行危险分析	0.5	M52	未说明应急物资与装备	0.2
A1311	未分析突发事件风险的来源	0.125	A521	未说明应急处置所需物资和装备的类型	0.04
A1312	未说明突发事件可能导致紧急情况类型	0.125	A522	未说明应急处置所需物资和装备的数量	0.04
A1313	未说明突发事件可能导致紧急情况的影响范围	0.125	A523	未说明应急处置所需物资和装备的性能	0.04
A1314	未说明突发事件可能导致紧急情况的后果	0.125	A524	未说明应急处置所需物资和装备的存放位置	0.04
M132	未进行资源分析	0.5	A525	未说明应急处置所需物资和装备的管理责任人	0.04
A1321	未分析预案可用的应急力量的组成及各自的应急能力	0.25	M53	未说明通信与信息方法	0.2
A1322	未分析预案可用的各种应急设备及物资的准备情况	0.25	A531	未说明与相关部门通信渠道	0.067
M14	未明确应急指挥机构及职责	1	A532	未说明与相关部门信息沟通手段	0.067
M141	未说明指挥机构的组织体系	1	A533	未说明与相关部门在极端条件下保证通信的方法	0.067
A1411	未说明预案的应急指挥机构组成	0.5	M54	未说明经费来源	0.2
A1412	未设置相应的应急处置工作小组	0.5	A541	未说明预案应急经费的来源	0.05
A142	未说明指挥机构的职责	1	A542	未说明预案应急经费的管理	0.05
M2	未进行监测与预警	1	A543	未说明预案应急经费的使用方式	0.05
M21	未进行风险监测	0.33	A544	未说明预案在应急状态时保障经费到位的措施	0.05
A211	未说明预警信息收集的负责部门及人员	0.165	M55	未说明其他相关保障措施	0.2
A212	未说明预警信息收集的渠道和风险监控的方法	0.165	A551	未说明交通运输保障措施	0.04
C211	如果预案针对的突发事件可以实施预警		A552	未说明安全保障措施	0.04
M22	未进行预警信息报告与发布	0.33	A553	未说明治安保障措施	0.04
A221	未说明预警信息的报告程序	0.165	A554	未说明医疗卫生保障措施	0.04
A222	未说明预警信息的发布程序	0.165	A555	未说明后勤保障措施	0.04
C221	如果预案针对的突发事件可以实施预警		M6	未进行培训和演练	1
M3	未进行应急响应	1	M61	未进行培训	0.5
M31	未进行响应分级	0.2	A611	未说明应急培训的对象	0.167
A311	未说明各级应急响应具体、量化的分级标准	0.067	A612	未说明应急培训的方式	0.167
A312	未说明各级应急响应和应急处置的主体	0.067	A613	未说明应急培训的内容要求	0.167
A313	未说明预案的启动程序	0.067	M62	未进行预案演练	0.5
M32	未进行信息报告	0.2	A621	未说明预案演练的频度	0.167
A321	未说明本单位及上级应急办公室 24 小时应急值班电话	0.033	A622	未说明预案演练范围	0.167
A322	未说明向上级部门报告的程序	0.033	A623	未说明预案演练的主要内容	0.167
A323	未说明向上级部门报告的方法	0.033	M7	未明确预案附则内容	1
A324	未说明向上级部门报告的内容	0.033	A71	未说明预案的报备部门	1
A325	未说明向上级部门报告的时限	0.033	M72	未说明预案的维护与更新	1
A326	未说明与相关部门的通信、联络方式	0.033	A721	未说明对预案进行维护和更新的条件	0.33
M33	未进行应急处置	0.2	A722	未说明对预案进行维护和更新的周期	0.33
A331	未说明应急响应程序	0.067	A723	未说明对预案进行维护和更新的负责部门	0.33
A332	未说明扩大应急响应的条件和方式	0.067	A73	未说明负责预案制定和解释的部门	1
A333	未说明应急处置的措施	0.067	A74	未说明预案实施的时间	1

注：P 表示事件权重。C221、C231 为条件事件，无权重。

3 完备性分析

取出笔者制定的某待评价预案^[7]，对照表 2 中

的基本事件集，找出该预案缺失的基本事件如表 3。

得到缺失基本事件的作用有两方面：一是可据其进一步完善预案，二是据其权重可对预案的完备

度进行量化分析。本文提出用式(2)计算应急预案的完备度。

表3 缺失的基本事件及其权重

Tab.3 Missing basic events and their weights

符号	P
A1121, A1122, A123, A42	0.33
A1321	0.25
M55	0.2
A411, A412	0.165
A1311, A1312, A1313, A1314	0.125
A431, A432, A433	0.11
A311, A331, A332, A513, A533	0.067
A541, A542, A543, A544	0.05
A523, A551, A552, A553, A554, A555	0.04
A321, A322, A323, A324, A325	0.033

$$C = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n p(e_i)}{\sum_{j=1}^N p(e_j)}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: n 为缺失基本事件的数量; N 为全部基本事件的数量; $p(e_i)$ 和 $p(e_j)$ 表示基本事件权重。

使用式(2)计算待评价预案的完备度如下(因条件事件 C211 与 C221 未发生, M2 对应基本事件未参与计算)。

$$C = (1 - \frac{\sum_{i=1}^n p(e_i)}{\sum_{j=1}^N p(e_j)}) \times 100\% = (1 - \frac{3.87}{16}) \times 100\% = 75.91\% \quad (3)$$

通过计算,该应急预案的完备度为 75.91%, 不完备度为 24.09%。提高完备度的方法是: 针对表 3 中缺失基本事件对预案进行修订完善。

4 结语

在评价过程中有如下问题可供进一步探讨。① 现有研究还停留在对某单一预案进行评价的阶段, 可将其扩展至对预案集进行整体评价。② 采用本文方法进行的量化分析对上级部门发布的应急预案编制导则本身的权威性提出了高要求。③ 应急预案制定过程的标准化与流程化是一个必然方向, 这有助于推动该过程的计算机化。

应急预案研究的最高目标应该是预案实用化, 完备性评价是其实现途径之一。实用化研究的其他内容笔者将另文介绍。

参考文献

- [1] 吴宗之, 刘茂. 重大事故应急预案分级、分类体系及其基本内容[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 15-18.
WU Zong-zhi, LIU Mao. Gradation and categorization system of emergency plan for major accidents and their main contents[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 15-18.
- [2] 刘吉夫, 张盼娟, 陈志芬, 等. 我国自然灾害类应急预案评价方法研究(I): 完备性评价[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(2): 5-11.
LIU Ji-fu, ZHANG Pan-juan, CHEN Zhi-fen, et al. Study on evaluation method of natural disaster emergency plan in China (part 1): completeness evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(2): 5-11.
- [3] 邢娟娟. 重大事故的应急救援预案编制技术[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1): 57-59.
XING Juan-juan. Technique for drawing up emergency response protocol for severe accidents[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(1): 57-59.
- [4] 胡勇. 基于故障树分析法-电力变压器故障诊断[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
HU Yong. The fault diagnose of electric power transformer basing on fault tree analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002.
- [5] 景国勋, 贾智伟, 段振伟, 等. 最小割集在系统安全分析方法中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 99-102.
JING Guo-xun, JIA Zhi-wei, DUAN Zhen-wei, et al. Application of minimum cutset in system safety analysis[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(5): 99-102.
- [6] 某电网公司突发事件应急预案编制指南[EB/OL]. <http://km.yepg.com/html/portlet/km/exhibit/viewCommon.jsp?1=1&knowledgeId=8a3486cc1c44f121011c68f4a3160796&canClose=1&canCancel=0>
- [7] 云南电网公司. 云南电网公司突发事件应急预案编制指南 [EB/OL]. [2008-01-25]. <http://km.yepg.com/html/portlet/km/exhibit/viewCommon.jsp?1=1&knowledgeId=8a3486cc1c44f121011c68f4a3160796&canClose=1&canCancel=0>
Yunnan Power Grid Corporation. Compilation guide of the sudden events preplan of Yunnan Power Grid Corporation. [EB/OL]. [2008-01-25]. <http://km.yepg.com/html/portlet/km/exhibit/viewCommon.jsp?1=1&knowledgeId=8a3486cc1c44f121011c68f4a3160796&canClose=1&canCancel=0>

(下转第 69 页 continued on page 69)

- SUN Jing-qiang, CHEN Zhi-gang, CAO Hua-zhen, et al. Analysis of low frequency oscillation of South China Power Grid in 2010[J]. Power System Technology, 2007, 31 (S2): 93-97.
- [8] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 78-83.
- DENG Ji-xiang, HE Jian-ming, YAO Tian-liang, et al. Analysis of lower frequency oscillation for Sichuan Power Grid in large scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2008, 32 (17): 78-83.
- [9] 赵义术, 杨树新, 牛新生, 等. 2005年冬季华北-华中联网运行中的低频振荡计算分析[J]. 山东电力技术, 2006 (2): 3-6.
- ZHAO Yi-shu, YANG Shu-xin, NIU Xin-sheng, et al. Low-frequency oscillation analysis of the interconnected power system of Hubei and Huazhong in the winter operating arrangement in 2005[J]. Shandong Electric Power Technology, 2006 (2): 3-6.
- [10] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [11] 汤涌, 朱方, 张东霞, 等. 华北-东北联网工程系统调整试验[J]. 电网技术, 2001, 25 (11): 46-54.
- TANG Yong, ZHU Fang, ZHANG Dong-xia, et al. Commissioning tests of interconnection of North China Power Grid with Northeast China Power Grid[J]. Power System Technology, 2001, 25 (11): 46-54.
- [12] 房喜, 印永华, 杨万开, 等. 750 kV 输变电示范工程系统小扰动试验分析[J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 40-43.
- FANG Xi, YIN Yong-hua, YANG Wan-kai, et al. Analysis on system small disturbance test of 750 kV pilot project[J]. Power System Technology, 2006, 30 (24): 40-43.
- [13] 危雪, 周云海, 胡翔勇. 基于小干扰稳定分析的电力系统稳定器配置研究[J]. 广东电力, 2008, 21 (11): 1-4.
- WEI Xue, ZHOU Yun-hai, HU Xiang-yong. Study on configuration of power system stabilizer based on small-signal stability analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21 (11): 1-4.
- [14] 李杨楠, 刘文颖, 潘炜, 等. 西北 750 kV 电网动态稳定特性分析和控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31 (12): 63-68.
- LI Yang-nan, LIU Wen-ying, PAN Wei, et al. Analysis of dynamic stability characteristic of 750 kV northwest China power grid and research on its control strategy[J]. Power System Technology, 2007, 31 (12): 63-68.
- [15] 王青, 孙华东, 等. 电力系统小干扰稳定安全评估的一般原则及其在贵州电网中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 24-28.
- WANG Qing, SUN Hua-dong, et al. General principle of power system small signal stability evaluation and its application in Guizhou power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33 (6): 24-28.
- [16] 刘学智, 刘涤尘, 袁荣湘, 等. 联络线潮流对互联电网低频振荡模式的影响[J]. 中国电力, 2009, 42 (10): 39-41.
- LIU Xue-zhi, LIU Di-chen, YUAN Rong-xiang, et al. The influence of tie-line power flow on low-frequency mode in interconnected power system[J]. Electric Power, 2009, 42 (10): 39-41.
- [17] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真[J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 38-41.
- TANG Hong, WU Jun-ling, ZHOU Shuang-xi. Modeling and simulation for small signal stability analysis of power system containing wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28 (1): 38-41.

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-05-24

作者简介:

李刚 (1979-), 男, 博士, 工程师, 主要从事电网规划和运行控制方面的研究工作; E-mail: lgjjj3@163.com

刘晓瑞 (1978-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网工程设计工作;

张廷营 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事 FATCS 装置和次同步谐振方面的研究。

(上接第 63 页 continued from page 63)

- [8] 云南电网公司调度自动化系统黑启动预案[EB/OL]. <http://gaoyugui.blog.sohu.com/118833602.html>.
The black start preplan of the dispatching automation system of Yunnan Power Grid Corporation. Compilation[EB/OL]. <http://gaoyugui.blog.sohu.com/118833602.html>.

作者简介:

高明 (1978-), 男, 工程师, 硕士, 从事电力系统分布式计算与电力系统仿真研究; E-mail: gaoyugui0508@163.com

李文云 (1965-), 男, 教授级高级工程师, 从事电网运行管理及电力系统稳定分析研究工作;

袁德君 (1966-), 男, 高级工程师, 从事 EMS 运行管理工作。

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2010-04-19