

大型电网连锁故障分析及大停电智能预警系统

刘挺坚, 刘俊勇, 刘友波

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 连锁故障引发的大停电事故在全球范围内时有发生, 对社会和经济造成了巨大损失。为了理解连锁故障的演变特征并进一步构建有效的大停电预防系统, 回顾近年来国内外发生的 8 次大停电事故, 研究大停电事故的故障演化过程; 对现有连锁故障研究模型和方法进行评述, 分析其适用性及模型优缺点; 提出基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法; 最终基于所提连锁故障时序事件搜索方法构建了可用于大停电风险可视化预警的智能预警系统。

关键词: 连锁故障; 演变特征; 时序事件; 大停电预防; 可视化预警

Abstract: Great blackouts induced by cascading failures occurred frequently in recent years, resulting in great loss in society and economy. In order to understand the evolution feature of cascading failures and further establish an effective blackout prevention system, the evolution procedure of great blackouts is firstly studied by reviewing eight great blackouts occurred in the worldwide, and then the methodologies for cascading failures analysis are reviewed. After that, an analysis method based on event checkers and continuous time domain simulation is proposed. Consequently, the application system for great blackout mitigation is established.

Key words: cascading failures; evolution feature; time-series events; blackout prevention; alert visualization

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0001-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.001

电网的大规模互联提高了能源经济效益和供电可靠性, 然而近年来大停电事故时有发生: 2003 年北美^[1-2]、伦敦^[3]、意大利^[4]先后发生大停电事故; 2006 年中国华中电网^[5]和欧洲电网^[6]先后发生大停电事故; 巴西电网在 2009 年^[7]和 2011 年^[8]分别发生两次大停电事故; 印度电网在 2012 年 7 月 30 日和 31 日发生两起大停电事故^[9]。随着现代微机保护装置和励磁控制器的应用, 单一故障一般难以造成系统崩溃, 而具有时序特性和传播特性的连锁故障却成为引发大停电的主要故障形式。尽管连锁故障属于极小概率事件, 然而大停电事故所带来的巨大经济损失使得连锁故障受到系统运行人员和科研人员的广泛关注。

为了更好地理解连锁故障的演化过程并进一步建立有效的大停电预警系统, 首先回顾近年来国内外发生的连锁故障实例, 阐述连锁故障演化过程并分析各次大停电事故的系统演变特征; 对现有连锁故障研究方法进行评述, 在此基础上提出基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法; 最终基于所提连锁故障时序事件搜索方法构建了可用于大停电风险评估的可视化智能预警系统。

基金项目: 四川省科技厅产业发展重大关键技术项目(2011GZ0225)

1 连锁故障演变机理及相关研究方法评述

1.1 连锁故障演变机理

连锁故障往往起源于系统运行资源紧张(如重负荷、重要发/输电设备停运)情况下的某一个或一系列原发性故障(initial events), 即 $N-k$, 进而引发具有时序特征的相继事件(consequential events), 形式上形成 $N-k-1-1\cdots-1$, 这些事件在因果上一般具有较强关联关系, 是一个伴随着低压、过载、保护频繁动作、解列、失稳、频率波动等系统响应的复杂交叠过程^[10]。

连锁故障演化过程如图 1 所示。初始阶段, 输电线路短路或意外跳闸、发电机组意外脱网、直流闭锁等原发性故障发生, 系统偏离计划运行状态。故障阶段, 时序事件相继发生, 系统状态持续恶化。故障阶段一般存在快慢交替的故障过程和时序事件, 其中慢过程事件主要是潮流转移引发的保护 III 段开断过载线路或隐性故障引发的重载输电设备误切, 快过程事件包括重要输电通道发生功率振荡引发系

统解列、发电机保护动作切除机组、低压/低频切负荷、电动机低压堵转等。随着相继大规模切机切负荷,系统发生大停电事故,时序事件结束。

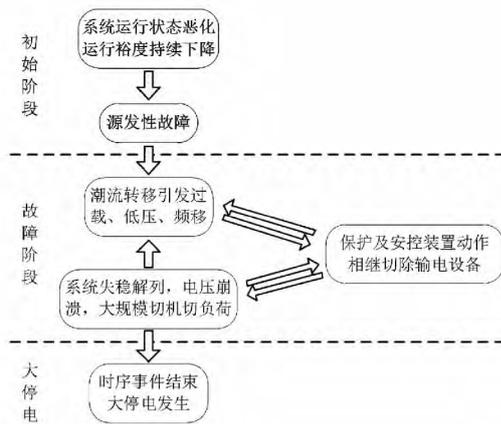


图 1 连锁故障演化过程

文献[11]基于连锁故障演变过程的关键事件将故障演变形态归纳为元件过载主导型、电网结构主导型和保护配合主导型: 1) 元件过载主导型的典型特征为故障前期潮流转移导致线路缓慢地相继被切,中后期临界事件引发极快的、难以逆转的电压崩溃和无序切机切负荷,2003 年北美和 2003 年意大利属于元件过载主导型连锁故障; 2) 电网结构主导型的典型特征为联络线功率振荡使得自动解列装置迅速把电网解列为若干子系统,各子系统内功率严重不平衡导致大规模切机切负荷,2006 年欧洲、2009 年巴西和 2012 年印度属于电网结构主导型连锁故障; 3) 保护配合主导型的典型特征为二次设备隐性故障导致源发故障扩大化从而促进潮流转移和故障传播,2003 年伦敦、2006 年华中和 2011 年巴西属于保护配合主导型连锁故障。

1.2 现有连锁故障研究方法评述

OPA 模型^[12-13]、CASCADE 模型^[14]、隐性故障模型^[15]、Manchester 模型^[16]、脆弱元件模型^[17]、复杂网络模型^[18]、概率风险模型^[19]等模型先后被提出并用于研究连锁故障的演化机理:

1) OPA 模型考虑连锁故障引发停电事故的快动态过程和系统扩容的慢动态过程,能够研究系统的长期停电风险和自组织临界特性,然而在模型精度和计算耗时上需要折中;

2) CASCADE 模型考虑线路开断后潮流转移引发新一轮线路过载开断的过程,然而其抽象概率模型难以反映电力系统的物理特性;

3) 隐性故障模型建立考虑线路运行状态的保护装置动作概率模型,从而模拟保护系统在故障传播过程中推波助澜的作用;

4) Manchester 模型基于切负荷控制的交流潮流

算法研究连锁故障的演化过程,按线路负载率识别下一故障线路,然而未能考虑系统的动态特性;

5) 脆弱元件模型通过元件脆弱性评估确定下一故障线路,能够识别对系统冲击最大的 $N-k$ 故障场景;

6) 复杂网络模型把电力系统抽象为由边和节点组成的网络拓扑模型,按给定模式攻击网络从而得到电网在连锁故障下的结构脆弱性评估;

7) 概率风险模型结合概率推理方法和隐性故障模型进行故障传播路径搜索,给定初始故障后可生成相应的故障树并对不同故障链路进行风险分析。

上述模型均基于准稳态潮流进行连锁故障时序事件搜索,能够模拟元件相继过载的连锁故障演化过程,由于其避免了系统暂态过程的时域仿真,分析效率得以显著提高。

2 基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索

尽管准稳态潮流方法在系统稳定裕度较高的连锁故障前期仍能较好地反映系统的演化特征,在连锁故障中后期却难以考虑对系统冲击最为严重的系统解列事件和相继切机事件,因而难以全面、准确地分析连锁故障的演化过程以及故障后果。因此需建立安控装置和继电保护启动条件校核规则库(event checkers),利用单次时域仿真参数轨迹进行动作判据校核,逐步形成次级时序事件并形成事件链路,最终对事件链路进行时域仿真进而评估故障风险。

2.1 自动解列装置模型

自动解列装置一般部署在两区域之间的联络线上。若两区域同调机群发生振荡且振荡中心点位于联络线上,当中心点电压持续小于整定电压达到设定时间,自动解列装置则跳开联络线。为了提高事件校核速度,这里采用联络线两侧电压相角差 $\Delta\theta$ 超过 180° 时自动解列装置动作的简化校核规则,且自动解列装置正确动作的概率为 0.999。

2.2 高频/低频切机模型

系统发生扰动后,发电机机端频率将偏离额定值,若频率偏离机组的正常运行范围,高频/低频切机装置将切除机组。高频/低频切机装置采用文献[20]定义的概率模型如式(1)所示。

$$P_{cr} = \begin{cases} 0.001, & f_1 \leq f \leq f_2 \\ 0.001 + 0.998 \times \frac{f-f_2}{f'_2-f_2}, & f_2 < f \leq f'_2 \\ 0.001 + 0.998 \times \frac{f-f_1}{f'_1-f_1}, & f'_1 < f \leq f_1 \\ 0.999, & f > f'_2 \parallel f < f'_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: 动作阈值 f'_1, f_1, f_2, f'_2 分别为 48.5 Hz、49 Hz、51 Hz 和 51.5 Hz; 装置动作延时为 0.5 s。另外当发电机机端频率高于 55 Hz 或低于 45 Hz 时不经延时直接切除机组。

2.3 低压/低频减载模型

系统各区域选择电压/频率测量点, 当系统出现无功/有功严重缺额使得电压/频率持续低于减载装置整定值达到动作时间, 区域负荷按减载规则被切除。低压/低频减载装置同样采用文献 [20] 定义的概率模型如式 (2) 所示。式中 X 为减载装置测量的节点频率 f 或电压 V 。

$$P_{LS} = \begin{cases} 0.001, & X < X' \\ 0.001 + 0.998 \times \frac{X - X'}{X'' - X'}, & X'' \leq X \leq X' \\ 0.999, & X < X'' \end{cases} \quad (2)$$

自动减载装置一般采用多轮次减载方案, 这里所采用的减载方案如表 1 所示。其中各轮次的动作延时均为 0.5 s。

表 1 自动减载方案

轮次	(f', f) /Hz	减载量 /%	(V'', V') / (p. u.)	减载量 /%
1	(48.75 49.00)	10	(0.82 0.85)	5
2	(48.50 48.75)	7	(0.78 0.82)	5
3	(48.25 48.50)	7	(0.75 0.78)	5
4	(48.00 48.25)	7	—	—

2.4 线路过流保护模型

线路过流保护采用隐性故障模型^[15], 其动作概率模型如式 (3) 所示。

$$P_{LO} = \begin{cases} 0, & 0 \leq i \leq 0.1I_{th} \\ 0.9 \times (10i - I_{th}) / 9I_{th}, & 0.1 < i \leq I_{th} \\ 0.9, & i > I_{th} \end{cases} \quad (3)$$

2.5 基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法

基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索步骤如下:

- 1) 输入系统初始运行工况和源发性故障, 并把源发性故障加入到时序事件链中。
- 2) 对时序事件链进行时域仿真, 得到系统的受扰响应。
- 3) 利用规则库中的各类 event checker 对系统受扰响应进行扰动事件搜索, 记录安控装置和继电保护触发的新扰动事件。
- 4) 检查安控装置和保护是否触发新的扰动事件。若是, 选择最先发生的事件作为下一时序事件并刷新事件链, 返回步骤 2) 重新进行时域仿真; 若否, 转到步骤 5)。

5) 输出时序事件链, 统计负荷损失。

上述时序事件搜索方法的流程图如图 2 所示。

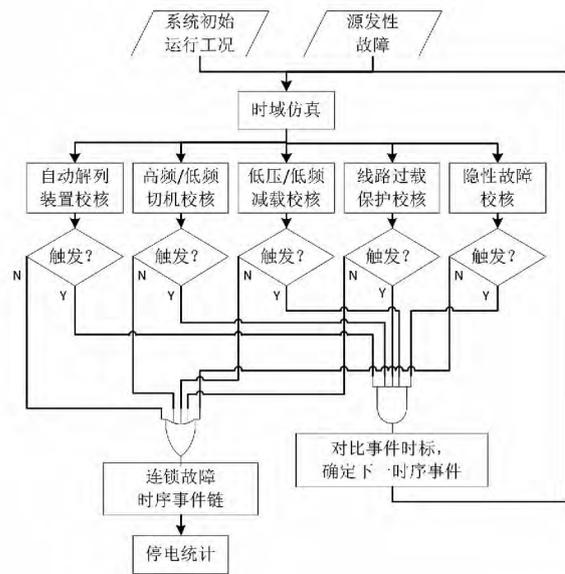


图 2 基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障时序事件搜索方法流程图

3 算例

采用 PSD - BPA 时域仿真程序作为计算核心, 利用 JAVA 开发所提的基于事件校核和连续时域仿真的连锁故障仿真程序。以四川电网作为算例对象进行基于事件校核和连续时域仿真方法的连锁故障演化过程仿真和时序事件搜索。设置初始故障为 500 kV 线路“普提—洪沟” I 回线路无故障开断。仿真得到的时序事件如表 2 所示。

表 2 连锁故障时序事件

No.	时间	事件
1	1"	500 kV“普提—洪沟” I 回开断
2	19.6"	220 kV“朱坎—南天”双回过载开断
3	30"	500 kV“普提—南天” I 回过载开断
4	40.8"	“普提—洪沟” II、III 回过载开断
...
5	41.36"	二滩机组高频切机
...
6	43.5"	临巴机组低频切机
...
7	44.26"	系统崩溃, 大停电发生

图 3 ~ 图 6 分别为连锁故障演化过程中 500 kV 线路“南天—东坡”有功功率变化、二滩机组机端电压频率变化、临巴机组机端电压频率变化和尖山 500 kV 母线电压幅值变化。从图 4 ~ 图 7 可以得知, 连锁故障前期, 系统保持较高的稳定裕度, 暂态过程各状态量偏移幅度较小, 难以反映系统运行裕

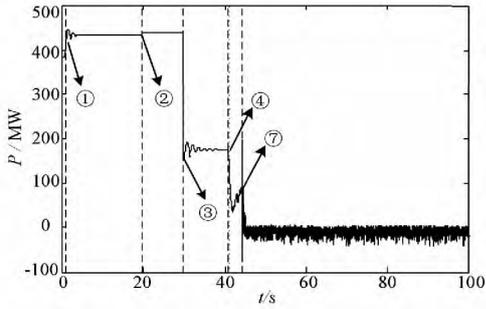


图3 500 kV 线路“南天一东坡”有功功率

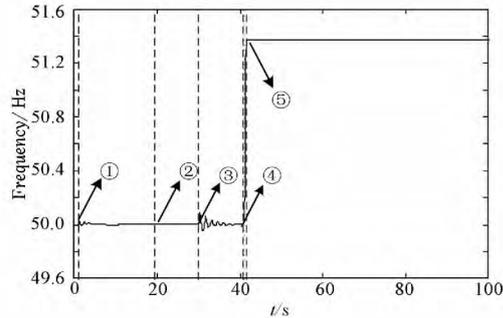


图4 二滩机组机端电压频率

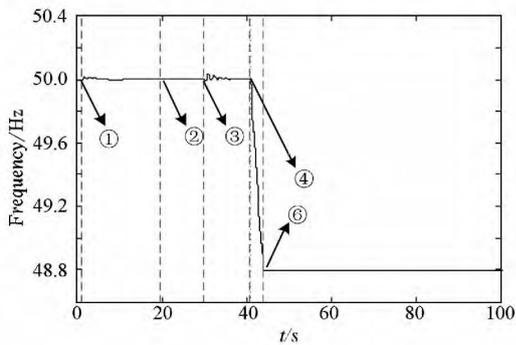


图5 临巴机组机端电压频率

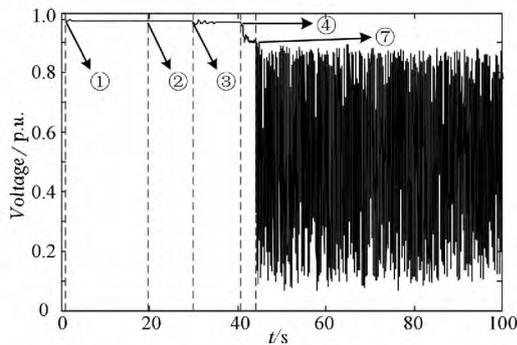


图6 尖山 500 kV 母线电压幅值

度恶化的趋势。故障中后期,临界事件触发后各状态量剧烈振荡,大规模切机切负荷相继发生,随之系统发生大停电事故。

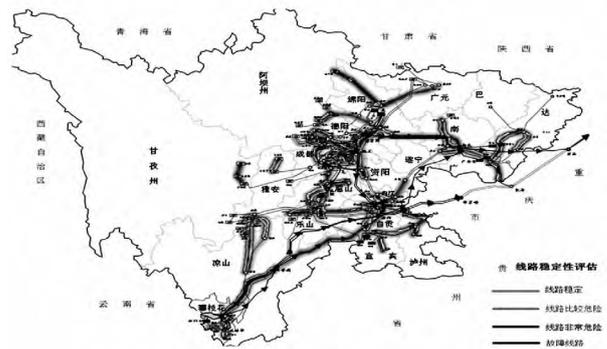
4 大停电智能预警系统

基于所提的连锁故障时序事件分析方法开发大

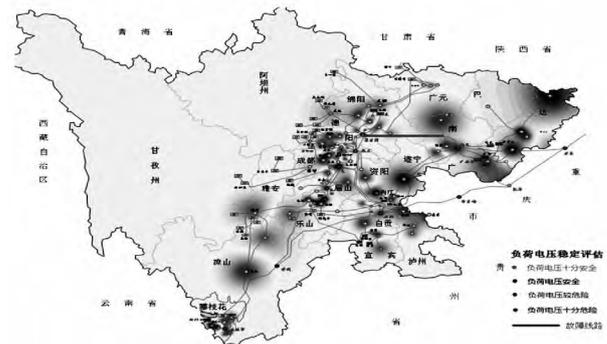
停电风险评估和智能预警系统。导入电网初始运行方式和源发故障,预警系统调用前述连锁故障时序事件搜索分析方法进行仿真,仿真完毕后返回系统状态量受扰轨迹、时序事件链以及停电信息。

此外,基于阶段脆弱性^[21]的概念,系统在准稳态和暂态阶段分别进行系统关键元件的评估和识别,并进行可视化预警。在准稳态阶段,系统进行基于源-荷节点对功率关联特性的脆弱线路辨识^[22]和基于P-Q解耦模型的节点电压脆弱性评估^[23],如图7所示。

在故障后暂态阶段,系统进行基于发电机转子动能进行风险机组辨识和基于支路势能进行脆弱线路辨识,如图8所示。

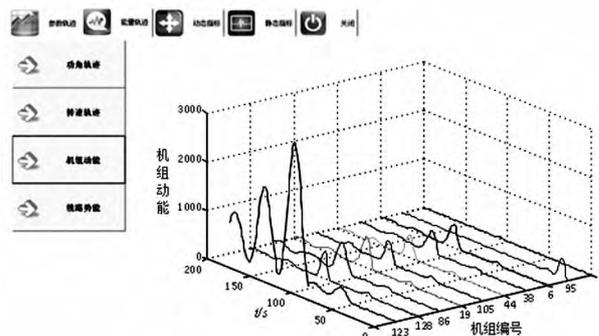


(a) 准稳态阶段线路脆弱性可视化预警

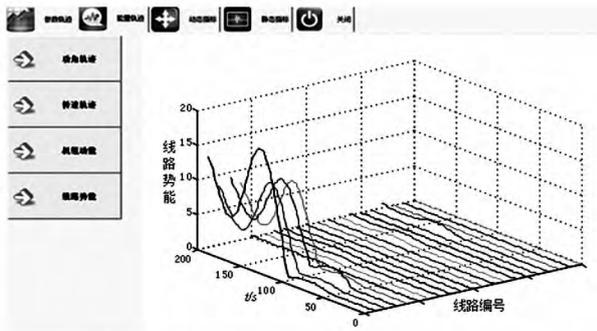


(b) 准稳态阶段节点电压脆弱性可视化预警

图7 准稳态阶段关键元件识别及可视化预警



(a) 暂态阶段风险机组可视化预警



(b) 暂态阶段动态脆弱线路可视化预警

图8 暂态阶段关键元件识别及可视化预警

5 结论

首先阐述了连锁故障的典型演化过程,回顾了近年国内外8次大停电事故,对其故障演变形态进行分类;然后对现有连锁故障研究方法进行综述,对其优缺点进行比较;为了克服准稳态潮流方法难以考虑连锁故障中后期系统解列事件和相继切机事件的缺点,建立安控装置和继电保护启动条件校核规则库(event checkers),提出采用基于事件校核和连续时域仿真的时序事件搜索方法,从而更准确地模拟连锁故障的演化过程和评估系统停电风险;最终结合所提连锁故障时序事件搜索方法和阶段脆弱性评估方法构建了可用于大停电风险评估和脆弱元件识别的可视化智能预警系统。

参考文献

[1] U. S. - Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations [R/OL]. <http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/BlackoutFinal-Web.pdf>.

[2] 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 1-5.

[3] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5.

[4] Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy [R/OL]. http://www.rae.gr/old/cases/C13/italy/UCTE_rept.pdf.

[5] 华中电网“7·1”事故调查组技术组. 华中电网“7·1”事故调查报告[R]. 2006.

[6] Final Report System Disturbance on 4 November 2006 [R/OL]. https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/ce/otherreports/Final-Report-20070130.pdf.

[7] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.

[8] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“2·4”大停电事故及

对电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 1-5.

[9] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7·30”、“7·31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.

[10] 张国华, 张建华, 杨志栋, 等. 电力系统N-K故障的风险评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 17-21.

[11] 刘友波, 胥威汀, 丁理杰, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(二)——关键特征与研究启示[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 146-155.

[12] I. Dobson, B. A. Carreras, V. E. Lynch, et al. An Initial Model for Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts [C] // Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, January 3-6, 2001, Maui, HI, USA: 710-718.

[13] 刁塑, 刘友波, 刘俊勇, 等. 电力系统连锁故障的多层时序运行演化模型与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(S1): 82-92.

[14] I. Dobson, B. A. Carreras, D. E. Newman, et al. A Probabilistic Loading-dependent Model of Cascading Failure and Possible Implications for Blackouts [C] // Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, January 3-6, 2001, Maui, HI, USA.

[15] J. Chen, J. S. Thorp, and I. Dobson. Cascading Dynamics and Mitigation Assessment in Power System Disturbances via a Hidden Failure Model [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005(27): 318-326.

[16] D. S. Kirschen, K. R. W. Bell, D. P. Nedic, et al. Computing the Value of Security [J]. IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(2): 673-678.

[17] 苟竞, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于能量熵测度的电力系统连锁故障风险辨识[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2754-2761.

[18] C. Guo, Z. Dong, D. J. Hill, et al. Attack Structural Vulnerability of Power Grids: a Hybrid Approach Based on Complex Networks [J]. Physics A, 2010, 289: 595-603.

[19] 丁剑, 白晓民, 方竹, 等. 基于贝叶斯网络的扰动后预想事故分析方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 1-5.

[20] 于洋, 黄民翔, 辛焕海, 等. 基于动态仿真的连锁故障分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 15-21.

[21] 刘友波, 刘俊勇, 杨嘉澍, 等. 基于故障演化的电网阶段脆弱性及其可视化预警[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 46-52.

[22] 许立雄, 刘俊勇, 丁理杰, 等. 基于网络流系数的关键线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 91-96.

[23] 魏震波, 刘俊勇, 李俊, 等. 基于P\Q网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 19-22.

(收稿日期: 2016-01-05)