

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200343

大电网事故预案推演系统的设计与实现

蒋越梅^{1,2}, 卢敏³, 周浩涵^{1,2}, 邱红锴^{1,2}, 阙凌燕³

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106; 2. 北京科东电力控制系统
有限责任公司, 北京 100192; 3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 针对传统依靠人工编制事故预案无法覆盖全部事故情况, 且编制过程智能化和自动化不足等问题, 设计和开发了大电网事故预案自动生成推演系统。依据大电网事故处置预案的特点, 采用电网运行方式分析、灵敏度分析、拓扑分析和电网风险分析等方法, 结合DTS的仿真模拟功能, 自动生成涵盖事故前运行方式、事故情况、事故后运行方式、紧急控制方案、风险预控方案、设备恢复方案的事故预案。应用表明, 该系统可以针对灵活设定的运行方式和假想故障, 生成包含具体控制措施的事故预案, 具有较好的实用性。

关键词: 大电网; 事故预案; 电网风险; 紧急控制; 风险预控; 功率调整

Design and realization of an anticipated accident plan simulation system for a bulk power system

JIANG Yuemei^{1,2}, LU Min³, ZHOU Haohan^{1,2}, QIU Hongkai^{1,2}, QUE Lingyan³

(1. NARI Group Corporation Co., Ltd. (State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Nanjing 211106, China;
2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China;
3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: Traditional manual preparation of accident plans cannot cover all accidents. The preparation process is insufficient in intelligence and automation. This paper designs and develops an anticipated accident plan simulation system for a bulk power system. Given a bulk power grid accident plan, this paper adopts analysis methods of power network operation mode, sensitivity, topology and power network risks, combining the simulation function of DTS, to form accident plans automatically. These cover the operational mode before the accident, the accident situation, operational mode after the accident, an emergency control plan, a risk pre-control plan and an equipment recovery plan. The application shows that the system can generate accident plans containing specific control measures for flexible operation modes and faults, such that it has better practicability.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5211UZ18006K) "Research and Application of Key Technologies of Large Power Grid Pre-scheduling".

Key words: bulk power system; accident anticipated plan; power grid risk; emergency control; risk pre-control; power regulation

0 引言

电力系统安全稳定运行是现代社会维持正常运行的重要保障, 即使进入新世纪, 各国仍然发生了多起大停电事故^[1-5], 虽然电网事故的发生不可避免, 但是在事故发生后能够快速恢复送电, 也是提高电网安全稳定运行的重要保障之一。电网事故预

案是在电网一些典型运行方式下, 针对假想故障, 分析事故后的电网的危险点和薄弱点, 提出相应的控制和处理措施来编制事故预案。当电网一旦发生预案中的事故, 调度员可以根据预案中的控制措施及时、快速处置事故, 缩短事故处理时间, 从而使事故影响降低到最小程度。因此, 制定系统的、规范的、有效的电网事故预案对于提高调度运行人员的事故处理能力, 确保电网安全稳定运行有重要意义^[6-7]。

目前事故预案主要依靠人工编制, 借助潮流计

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5211UZ18006K)“大电网预调度关键技术研究及应用”

算、 $N-1$ 扫描计算、安全稳定分析等软件进行分析计算,并依据人工经验进行干预调整,编制成事故预案^[8-9]。已建立的预案大多是在一些典型运行方式、典型电网事故基础上建立的,并不能完全针对每种情况进行事故预案的编制,而当实际电网发生事故时,不一定与预案的假设情况完全相符,在事故处理时需要根据已有经验、以往案例、现场状况对预案加以适当的调整方可应用,因此,能够根据事故时的电网方式和事故情况智能化生成事故预案是十分有意义的。

目前,已经存在基于在线平台的省级电网事故预案自动化系统,依托在线安全稳定分析的系统潮流分析与辅助决策功能基础,可以实现预测潮流、建立预想事故集、搜索控制断面、事故监视与预案匹配等功能,实现事故预案自动编写^[10],但尚无法自动生成故障隔离、事故恢复等内容,无法完整实现事故预案所有模块;还有基于D5000系统的电网事故预案推演系统^[11],主要针对事故预案编制管理功能,可以将已经完成安全校验的事故处理方案,制作成相应的预案,不能直接生成新的事故预案;还有针对电网故障诊断^[12-20]、事故处置的辅助决策系统^[21-23]、电网安全问题的辅助决策^[24-25],主要对事故后的电网故障进行判断,或根据事故情况给出处置方案,以及根据电网安全稳定问题给出辅助决策,都无法给出完整的事故预案。

本文在调度员仿真培训系统(DTS)平台上研发了事故预案推演系统,充分利用DTS的仿真模拟功能,可以灵活设定运行方式和预想事故,在此基础上开发电网运行方式分析、紧急控制、风险控制、设备恢复等模块功能,建立事故预案推演系统,针对设定的运行方式和故障,实现事故预案的推演和自动生成。

1 总体设计

事故预案需要包括事故前电网运行方式、故障情况、事故后电网情况、事故处理等内容^[26],大电网的事故处理过程一般包括故障识别、紧急控制、预防控制和故障恢复4个环节^[27]。本文编制的事故预案内容包括事故前电网运行方式、事故情况、事故后运行方式、紧急控制方案、风险预控方案、设备恢复方案6大块,在DTS平台上,构建电网运行方式分析、调整控制、电网风险分析等基础模块,结合DTS的计算分析和故障模拟功能,建立事故预案的自动执行流程,实现事故预案的自动生成,事故预案推演系统总体结构如图1所示。

运行方式分析包括事故前运行方式分析和事

故后运行方式分析,事故前运行方式分析包括大电网的跨区跨省断面、负荷和出力情况、设备运行情况、片区电网情况等,事故后的运行方式分析包括电网结构变化、频率情况、电网越限、继电保护和自动装置动作情况、潮流转移等;事故模拟用DTS的仿真模拟功能,进行潮流计算、故障计算、继电保护和自动装置模拟等;紧急控制针对事故后电网的电网异常状况进行调整,包括对频率越限、断面越限、设备越限、电压越限情况给出控制措施;风险预控是在电网紧急控制后,对电网进行风险分析,并对分析出的电网风险制定预控方案;设备恢复是针对停运设备,制定设备的最优恢复顺序方案。

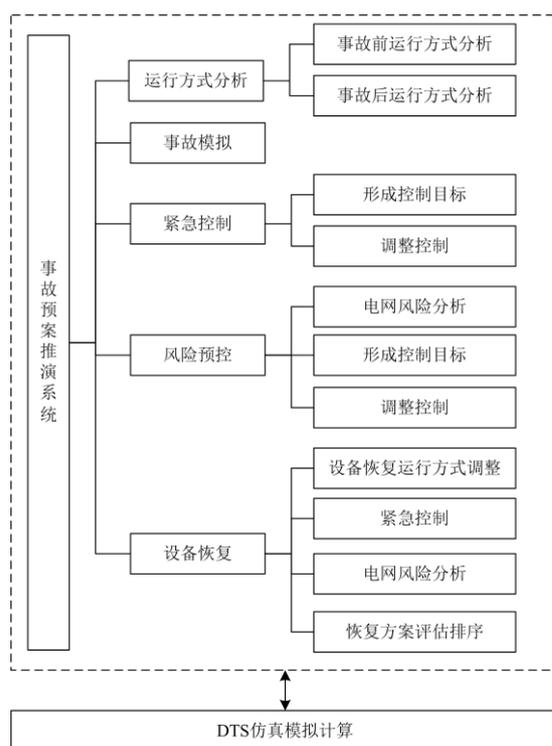


图1 事故推演系统框架

Fig. 1 Framework of accident plan simulation system

2 关键技术

2.1 运行方式分析

1) 事故前运行方式分析

在设定的运行方式下,扫描当前电网状态,形成跨区、跨省断面,负荷、出力、停运设备、供电片区等信息,以表格形式输出,输出内容如表1所示。

2) 事故后运行方式分析

在事故执行后,记录保护和自动装置动作情况,并针对事故后的电网进行扫描,形成电网结构变化、频率、电压越限、稳控装置动作、潮流越限、潮流转移等信息,以表格形式输出,输出内容如表2所示。

表 1 事故前运行方式内容

Table 1 Content of operation mode before accident

表格名称	表格内容
跨区/省断面	断面名称、断面功率、设备名称、设备功率
负荷	省份名称、负荷功率
出力	省份名称、厂站名称、设备名称、有功功率、设备状态、全厂出力
停运设备	省份名称、设备名称、设备类型、状态
供电片区	省份名称、片区名称、负荷、出力、备用

潮流越限形成断面、线路、变压器等设备的越限信息，潮流转移按照线路、变压器设备在事故前后有功功率的变化量从大到小进行排序，只输出变化量较大的设备。

表 2 事故后运行方式内容

Table 2 Content of operation mode after accident

表格名称	表格内容
电网结构变化	跳闸设备、系统解列情况、跨区或跨省断面变化情况、直流闭锁情况
频率	电气岛名称、故障前频率、故障后频率、电气岛负荷、频率越限情况
电压越限	设备名称、电压值、越限情况
潮流越限	设备名称、设备类型、电流值、越限情况
潮流转移	设备名称、电压等级、事故前有功值、事故后有功值、有功变化量

2.2 紧急控制

紧急控制是针对事故后的频率越限、电压越限、断面越限、线路/变压器设备越限情况形成的调整控制措施，紧急控制的控制目标是调整越限的频率、断面、线路、变压器、母线在规定的限额下。紧急控制可以分为针对频率越限、断面越限、设备越限进行的出力、负荷的有功调整和针对电压越限的无功调整。

1) 有功调整

针对需要调整的频率、断面、线路、变压器进行统一调整，采用基于灵敏度分析的等量匹配方式调整。

(1) 计算灵敏度矩阵

根据文献[28]得到的发电机输出功率转移分布因子矩阵(GSDF)为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

GSDF 是由发电机输出功率引起的支路潮流的

变化量，即为发电机注入节点对支路的灵敏度矩阵，其中， n 为发电机和负荷注入节点； m 为支路数。

为消除平衡机的影响，考虑支路的准稳态灵敏度矩阵为

$$\mathbf{C}' = \mathbf{F}_u \times \mathbf{C} \quad (2)$$

式中， \mathbf{F}_u 为准稳态物理响应线性化后的系数矩阵，本文考虑将不平衡量通过频率响应特性分配到各发电机和负荷来分担^[29]。

$$\mathbf{F}_u = \begin{bmatrix} 1-T_1 & -T_1 & \cdots & T_1 \\ -T_2 & 1-T_2 & \cdots & T_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -T_n & -T_n & \cdots & 1-T_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_i = \sum_{j \in \omega_i} (K_{Dj^*} \times P_{DNj}) / f_N + \sum_{k \in \omega_i} (K_{Gk^*} \times P_{GNk}) / f_N \quad (4)$$

式中： K_{Dj^*} 为节点 i 中的负荷 j 的频率调节效应系数标么值； P_{DNj} 为负荷 j 在额定频率的有功功率值， K_{Gk^*} 为节点 i 中的发电机 k 的调差系数的倒数的标么值； P_{GNk} 为发电机 k 在额定频率的有功功率值； f_N 为额定频率。

根据各支路的灵敏度矩阵，可得出由支路组成的断面灵敏度矩阵为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1l} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nl} \end{bmatrix} \quad (5)$$

从支路灵敏度矩阵 \mathbf{C}' 和断面灵敏度矩阵 \mathbf{S} 选出越限断面、线路和变压器支路等控制目标对应的灵敏度矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1h} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \cdots & m_{nh} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中， h 为控制目标的支路和断面数量总和。

(2) 筛选和排序

首先，对控制目标的灵敏度矩阵 \mathbf{M} ，根据灵敏度系数值，把对各控制目标作用相反且灵敏度系数值较大的调整节点去掉，筛选出可进行调整的节点组成的灵敏度矩阵。

然后，根据灵敏度系数值和控制目标，把可调整节点分为正向调整的灵敏度矩阵 \mathbf{M}_1 ，反向调整的灵敏度矩阵 \mathbf{M}_2 和零灵敏度矩阵 \mathbf{M}_0 。以发电机调整方向为参考，负荷相反。 \mathbf{M}_1 是需要增加功率的节点， \mathbf{M}_2 是需要减少功率的节点， \mathbf{M}_0 则是对控制

目标灵敏度较小的节点,可增加功率也可减少功率。

(3) 频率调整

如果有频率越限,需要先进行频率调整。

根据频率调整量,计算功率调整量 ΔP 为

$$\Delta P = \Delta f \times \left[\sum_{i=1}^n (K_{Di^*} \times P_{Dni}) / f_N + \sum_{j=1}^m (K_{Gj^*} \times P_{Gnj}) / f_N \right] \quad (7)$$

式中: Δf 为频率调整量; n 为电气岛内负荷数; m 为电气岛内发电机数。

根据需要增加功率,从正向调整的灵敏度矩阵按灵敏度大小选择发电机或负荷进行调整,如果需要减少出力,则从反向调整的灵敏度矩阵中选取发电机或负荷进行调整,如果无可调设备,从零灵敏度矩阵中选取设备。

(4) 支路和断面调整

从正向、反向调整的灵敏度矩阵选取发电机或负荷按等量匹配原则进行调整,增加功率与减少功率相同,维持系统频率不变,如果 M_1 或 M_2 中发电机和负荷调整量不足,则从零灵敏度矩阵 M_0 选取发电机和负荷进行调整。

2) 无功调整

无功调整按照无功就地平衡原则,采用拓扑搜索,搜索出调整节点所在电网附近无功补偿设备,按照电容电抗器、调相机、发电机无功等设备调整顺序,并按照由近及远顺序进行无功调整,形成无功调整方案。

2.3 风险预控

电网进行紧急控制后,电网异常情况虽然已经解除,但还需要对电网的潜在风险进行分析并进行预控,以防出现新的事故后扩大影响范围。

1) 电网风险分析

电网风险分析采用 $N-1$ 计算和拓扑分析,扫描的风险包括设备过热稳、电压越限、频率越限、电网解列、电网结构变化等五类风险。

$N-1$ 计算采用因子表修正方法,根据开断设备拓扑变化情况,直接修正原LU分解后的因子表进行计算,对于解列情况,则修正节点导纳矩阵,再重新形成因子表计算;对所有扫描设备通过线程池和信号量机制实现并行计算,提高计算速度。采用拓扑分析形成省间联络线削弱、省内分片、电磁环网解环、片区间联络通道全失、片区供电情况变化、设备带跳等电网结构变化。

对于设备过热稳、电压越限、频率越限三类风险,需要采用预控措施,以防电网发生对应设备故障时出现风险。

2) 电网风险预控

(1) 过热稳风险预控

当设备 i 开断,造成设备 j 越限时,潮流转移比 k 为

$$k = (P_{j1} - P_{j0}) / P_{i0} \quad (8)$$

式中: P_{i0} 为设备 i 开断前有功值; P_{j0} 为设备 i 开断前设备 j 的有功值; P_{j1} 为设备 i 开断后设备 j 的有功值。

因此,当设备 i 开断后,设备 j 的功率 P 计算公式为

$$P = k \times P_i + P_j \quad (9)$$

式中: P_i 为设备 i 的有功值; P_j 设备 j 的有功值。

为了保证当设备 i 开断后,设备 j 不越限,需要在当前运行方式下控制式(9)在设备 j 的限额内。因此,式(9)即为过热稳设备的控制断面,控制目标为 P 不超过设备 j 的限值。

节点 w 对新控制断面的灵敏度为

$$m_w = k \times c'_{wi} + c'_{wj} \quad (10)$$

式中: c'_{wi} 为节点 w 对设备 i 的灵敏度系数; c'_{wj} 为节点 w 对设备 j 的灵敏度系数。

有了断面控制目标和灵敏度,后续调整即可按照2.2节所述的有功调整方法,形成过热稳设备的预控方案。

(2) 频率越限风险预控

频率越限风险主要是由电网解列、大机组跳闸、直流闭锁等引起的,根据引起频率风险的跳闸设备,控制相应的联络线功率、大机组出力或直流功率。功率的控制目标根据式(7)来计算,根据频率的调整量计算功率的调整量,以此作为控制目标进行调整。

(3) 电压越限风险预控

电压越限风险调整过程同2.2节所述的无功调整部分内容。

2.4 设备恢复

在紧急控制和风险预控后,可以对电网中由于故障跳闸或电网控制切除的停电设备进行恢复,设备恢复方案要考虑停电设备的恢复顺序,停电后对电网影响大的设备应该优先恢复。停电设备对电网的影响情况,主要考虑停电设备造成的电网异常和电网风险。设备恢复流程如图2所示。

设备恢复顺序分多轮循环进行,每一轮都在未恢复设备中选取最优设备,其余设备在下一轮中重新选择。每一轮指定运行方式,即为事故前初始运行方式下,把前面轮次已经选出的最优设备恢复,

表 3 紧急控制方案

Table 3 Emergency control scheme

越限设备			控制措施
设备	有功/MW	限值/MW	
兴咸 三回	3 378	2 600	(1) 三峡右岸厂减少出力 247 MW (2) 水布垭厂减少出力 780 MW (3) 蒲圻二期厂增加出力 99 MW (4) 蒲圻厂增加出力 133 MW
葛安十 宜兴	4 220	4 000	(5) 井冈山二期厂增加出力 219 MW (6) 黄金埠厂增加出力 151 MW (7) 大唐抚州厂增加出力 101 MW (8) 洪屏厂增加出力 299 MW

表 4 电压越限紧急控制方案

Table 4 Emergency control scheme for voltage overload

越限设备			控制措施
设备	电压/kV	限值/kV	
宜都换流站/ 500 kV I 母线	508.78	510.00	(1) 恩施站切电抗器 (2) 兴隆站投电容器 (3) 咸宁站切电抗器

2) 风险预控方案

分析出电网风险后, 对过热稳风险的其中一个案例风险情况和预控措施如表 5 所示。

表 5 热稳风险预控方案

Table 5 Pre-control scheme for thermal stability risk

序号	预想故障	风险描述	预控目标	预控措施
1	峡都 I 线	峡都 II 线过热稳, 开断前电流值为 2 043 A, 开断后电流值为 2 944 A, 限值 2 656 A	控制断面[0.43 * 峡都 I 线+峡都 II 线]限额为 2 370 MW	(1) 三峡右岸厂减少出力 706 MW (2) 水布垭厂增加出力 617 MW
		峡都 III 线过热稳, 开断前电流值为 2 012 A, 开断后电流值为 2 899 A, 限值为 2 656 A	控制断面[0.43 * 峡都 I 线+峡都 III 线]限额为 2 370 MW	(3) 洞坪厂增加出力 22 MW (4) 南都电厂增加出力 66 MW

频率越限风险的部分风险情况和预控措施如表 6 所示, 该案例直流闭锁未考虑稳控装置动作情况, 如果考虑稳控装置动作, 则无频率越限风险。

电压越限风险的部分风险情况和预控措施如表 7 所示。

表 6 频率风险预控方案

Table 6 Pre-control scheme for frequency risk

序号	预想故障	风险描述	风险类型	预控目标
1	江城直流双极 闭锁	当前电气岛频率为 49.994 Hz, 开断后频率上升 0.267 Hz, 开断后频率为 50.261 Hz	频率越限	控制江城直流功率从 3 000 MW 降低到 1 150 MW, 降低功率 1 850 MW

表 7 电压越限风险预控方案

Table 7 Pre-control scheme for voltage overload risk

序号	预想故障	风险描述	风险评估	预控措施
1	樊钟 I 线	编钟站/500 kV I 母电压 489.06 kV	母线电压越下限	(1) 樊城站投电容器 (2) 十堰站切电抗器 (3) 卧龙站切电抗器, 投电容器 (4) 编钟站切电抗器, 投电容器

3) 设备恢复方案

对本事故所涉及的 2 个停电设备, 按照设备恢复方案所给出的恢复顺序如表 8 所示。

表 8 设备恢复方案

Table 8 Equipment recovery scheme

序号	设备恢复方案
1	斗山线恢复送电, 选择由斗笠站侧强送, 仙女山站侧合环
2	斗孝线恢复送电, 选择由斗笠站侧强送, 孝感站侧合环

通过比较验证, 本文所研发的事故预案推演系统生成的事故预案与现有的事故预案的事故处理控制措施方向一致, 但本文的事故预案控制措施更为具体, 可执行性和操作性较强。

4 结论

我国电网具有传输功率大、大区域间高压交流线路多、同步电网规模庞大和单回直流输电容量巨

大等特点,事故发生后容易扩大,调度人员事故处理难度较大,因此,制定系统的、规范的、有效的电网事故预案对于确保电网安全稳定运行具有重要意义。本文开发了事故预案推演系统,可以在设定运行方式下针对假想事故自动生成符合规范的电网事故预案,可行性和实用性较强,具有十分重要的参考价值。

目前,本文只考虑了电网静态安全风险,下一步,可以进一步考虑暂态安全风险,制定出更为完备的事故预案。

参考文献

- [1] Us-Canada Power System Outage Task Force. Interim report: causes of the August 14th blackout in the United States and Canada[EB/OL]. <http://www.nerc.com/>. 2003.
- [2] Project Group Turkey. Report on blackout in Turkey on 31st March 2015-final version 1.0[R]. ENTSO-E, 2015.
- [3] Australian Energy Market Operator. Black system South Australia 28 September 2016[R]. Melbourne: Australian Energy Market Operator, 2017.
- [4] Australian Energy Market Operator. System report South Australia, 8 February 2017[R]. Melbourne: Australian Energy Market Operator, 2017.
- [5] 尹项根, 徐彪, 张哲, 等. 面向调控运行的电网安全预警辅助支持系统[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 1-6.
YIN Xianggen, XU Biao, ZHANG Zhe, et al. Security early warning auxiliary system for power system dispatching and operation[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 1-6.
- [6] 王国平, 金磊, 谢建雄. 如何进行电网事故预案的编写[J]. 云南电力技术, 2009, 37(4): 27-28.
WANG Guoping, JIN Lei, XIE Jianxiong. How to compile the power grid accident anticipated plan[J]. Yunnan Electric Power, 2009, 37(4): 27-28.
- [7] 张锋. 电网事故预想制度化与规范化的探索[J]. 华东电力, 2010, 38(7): 52-54.
ZHANG Feng. Exploration on systematization and standardization of grid accident anticipation system[J]. East China Electric Power, 2010, 38(7): 52-54.
- [8] 郭华, 李林峰. 浅谈电网事故处理预案的定制管理[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 77-78.
GUO Hua, LI Linfeng. Discussion about customization management of power grid fault treatment plan[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 77-78.
- [9] 唐宝, 董征, 陈亦平. 网省地一体化电网事故处理预案定制管理[J]. 南方电网技术, 2012, 6(1): 103-106.
TANG Bao, DONG Zheng, CHEN Yiping. Customized plan making of integrated scheme of contingency management for region, province and city power grids[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(1): 103-106.
- [10] 石辉, 陈浩, 张思远, 等. 基于在线平台的省级电网事故预案自动化实现方法[J]. 湖南电力, 2017, 37(1): 18-23.
SHI Hui, CHEN Hao, ZHANG Siyuan, et al. Automatic implementation method of provincial power grid accident response plan[J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(1): 18-23.
- [11] 江千军, 周波, 程洪涛, 等. 基于 D5000 系统的电网事故预案推演系统设计[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(2): 157-162.
JIANG Qianjun, ZHOU Bo, CHENG Hongtao, et al. Design and research on power grid accident plan simulation system based on D5000 system[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(2): 157-162.
- [12] 屈子程, 高亮, 康保林, 等. 基于多源数据的电力系统故障全信息诊断模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 59-65.
QU Zicheng, GAO Liang, KANG Baolin, et al. A power system fault full information diagnosis model based on multi-source data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 59-65.
- [13] 颜肃, 张玮亚, 李宏仲, 等. 基于人工智能的输电线路故障快速诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 94-99.
YAN Su, ZHANG Weiya, LI Hongzhong, et al. Research on fast fault diagnosis of transmission line based on artificial intelligence[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 94-99.
- [14] 丁石川, 厉雪衣, 杭俊, 等. 深度学习理论及其在电机故障诊断中的研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 172-183.
DING Shichuan, LI Xueyi, HANG Jun, et al. Deep learning theory and its application to fault diagnosis of an electric machine[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 172-183.
- [15] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [16] 杨健维, 何正友, 臧天磊. 基于方向性加权模糊 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 42-49.
YANG Jianwei, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. Power system fault-diagnosis method based on directional weighted fuzzy Petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 42-49.
- [17] 周赞东, 龚浩, 吴念. 基于决策树的输电线路覆冰故障诊断分析[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 165-169.

- ZHOU Zandong, GONG Hao, WU Nian. Fault diagnosis of transmission line icing based on decision tree[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 165-169.
- [18] 吴瞻宇, 董明, 王健一, 等. 基于模糊关联规则挖掘的电力变压器故障诊断方法[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 157-163.
- WU Zhanyu, DONG Ming, WANG Jianyi, et al. Fault diagnosis of power transformer based on fuzzy association rules mining[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 157-163.
- [19] 倪良华, 闻佳妍, 吕干云, 等. 基于综合变权的分层模糊 Petri 网电网故障诊断方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(12): 111-117.
- NI Lianghua, WEN Jiayan, LÜ Ganyun, et al. Power grid fault diagnosis method of hierarchical fuzzy Petri net based on comprehensive variable weight[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(12): 111-117.
- [20] 郑国强, 汪玉, 郭军亮, 等. 基于 Petri 网的智能电网故障诊断定位方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(17): 85-92.
- ZHENG Guoqiang, WANG Yu, GUO Junliang, et al. Smart grid fault diagnosis and location method based on Petri net theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17): 85-92.
- [21] 鲍颜红, 冯长有, 徐泰山, 等. 电力系统在线安全稳定综合辅助决策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 104-110.
- BAO Yanhong, FENG Changyou, XU Taishan, et al. Online security and stability comprehensive auxiliary decision-making of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 104-110.
- [22] 杜红卫, 何勇, 张瑞鹏, 等. 地区电网调度智能辅助决策软件设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 108-112.
- DU Hongwei, HE Yong, ZHANG Ruipeng, et al. Design of regional power grid dispatching intelligent aided decision-making software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 108-112.
- [23] 项胤兴, 唐晓健, 林济铿. 黑启动路径生成及系统恢复辅助决策系统[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 122-131.
- XIANG Yinxing, TANG Xiaojian, LIN Jikeng. An assistant decision-making system for black-start path generation and system restoration[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 122-131.
- [24] 石辉, 张思远. 省级电网静态安全在线辅助决策优化建模[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 98-102.
- SHI Hui, ZHANG Siyuan. Optimization modeling of static security online decision support for provincial power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 98-102.
- [25] 鲍颜红, 冯长有, 徐泰山, 等. 电力系统在线安全稳定综合辅助决策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 104-110.
- BAO Yanhong, FENG Changyou, XU Taishan, et al. Online security and stability comprehensive auxiliary decision-making of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 104-110.
- [26] 苗增强, 李婷, 杨小卫, 等. 一种编写电网事故预案的方法[J]. 广西电力, 2011, 34(4): 24-27.
- MIAO Zengqiang, LI Ting, YANG Xiaowei, et al. A method for the compiling of emergency plan in power grid[J]. Guangxi Electric Power, 2011, 34(4): 24-27.
- [27] 陆瑞华, 闪鑫. 大电网在线事故处理辅助决策系统的设计与实现[J]. 华东电力, 2013, 41(11): 67-71.
- LU Ruihua, SHAN Xin. Design and implementation of decision support system for bulk power system on-line accident treatment[J]. East China Electric Power, 2013, 41(11): 67-71.
- [28] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [29] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 准稳态灵敏度的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 9-13.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. New sensitivity analysis method under quasi-steady-state for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 9-13.

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-10-03

作者简介:

蒋越梅(1982—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电网和变电站仿真培训; E-mail: jiangym122@163.com

卢敏(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: lu_min@zj.zpepc.com.cn

(编辑 周金梅)