

The Search Method of Load Division Program under the Power System Emergency State

Junyi Wen¹, Xiaobo Tang¹, Zhaowei Li², Yuxian Li¹, Caihong Zhao¹, Wei Li²

¹School of Electrical Engineering and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

²NARI Group Corporation, Nanjing Jiangsu

Email: 382050331@qq.com

Received: May 24th, 2016; accepted: Jun. 11th, 2016; published: Jun. 14th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The “Ordinances of Electrical Security Accident Emergency Disposal and Investigation” published by State Council had required to reduce load loss on the premise of ensuring the safety of power grid. The study of load division can solve the problem of some emergencies which have low demand of time control and decrease the load loss amount. According to the characteristic of load division which has low demand of time control, this article designs the start-up criterion under the emergency state and designs the search method of load division program which based on the sensitivity scheme. The rationality and effectiveness of the search method of load division program are verified by a practical example.

Keywords

Power System, Emergency State, Load Division, Sensitivity

电力系统紧急状态下的分负荷方案搜索方法

闻俊义¹, 唐小波¹, 李兆伟², 李雨鲜¹, 赵彩虹¹, 李威²

¹南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京

²南京南瑞集团, 江苏 南京

Email: 382050331@qq.com

收稿日期: 2016年5月24日; 录用日期: 2016年6月11日; 发布日期: 2016年6月14日

文章引用: 闻俊义, 唐小波, 李兆伟, 李雨鲜, 赵彩虹, 李威. 电力系统紧急状态下的分负荷方案搜索方法[J]. 电气工程, 2016, 4(2): 97-104. <http://dx.doi.org/10.12677/jee.2016.42013>

摘要

国务院《电力安全事故应急处置和调查处理条例》的实施，要求在保证电网安全的前提下减少负荷的损失，通过研究分负荷来解决一些对控制时间要求不高的电力系统紧急状态，从而减少切负荷量，甚至不需要切负荷。根据分负荷能解决的紧急状态对控制时间要求不高这个特性，提出紧急状态下的分负荷的启动判据。基于灵敏度分析法，提出了分负荷方案搜索方法。通过实际电网算例分析，得到的分负荷方案能解决紧急状态，从而减少负荷的损失。

关键词

电力系统，紧急状态，分负荷，灵敏度

1. 引言

《智能电网调度技术支持系统系列标准》中对紧急状态定义如下：紧急状态指电网出现的设备过载、断面越限、电压越限、频率越限和低频振荡等状态。一旦电网由正常状态或者警戒状态进入紧急状态，却没有及时采取紧急控制措施或者控制措施不起作用时，可能造成电力系统中出现停机、局部电压或系统频率越限等现象，部分负荷严重超出其额定值而中断供电，还可能引发电网连锁反应停电，甚至造成系统崩溃。针对这种很难保证系统同步运行和完整性的极端严重故障，这时应有计划和控制的进行系统解列、切机切负荷以及断开线路，尽可能多的将系统从大范围停电中恢复出来，保证系统的电压和频率在正常运行范围内。而国务院《电力安全事故应急处置和调查处理条例》(以下简称“条例”)的实施，要求在保证电网安全的前提下减少负荷的损失。对于一些对时间要求不高的紧急状态，可以通过其他方法来解决，比如分负荷。

分负荷通过开关操作来进行网络重构，进而达到改善电网运行状态的目的。与切负荷相比，分负荷能减少电网的减负荷量，响应了国务院的条例。由于分负荷调整一般是通过开关操作实现的，操作时间较长，难以解决暂态问题。但对于过载和电压越限问题运用分负荷技术会有很好的效果。实现分负荷技术的措施有以下几个：电磁环网的合环解环、备用线路的投切以及负荷转供[1]-[4]。

本文重点以过载和电压越限的紧急状态为例说明分负荷技术的应用。为了实现紧急状态下的分负荷技术，必须要解决以下两个问题：1) 分负荷启动判据。2) 分负荷方案获取。本文根据分负荷对操作时间要求不高这个特点出发，基于紧急程度制定相应的启动判据，进而基于灵敏度得到分负荷方案自动搜索算法。

2. 基于紧急程度的启动判据

本文提出的启动判据实质上是一种启发式方法，可以区分紧急状态的类型和紧急状态的程度，因而可以直接判定选用分负荷或切负荷措施，缩小了最优解的搜索空间，提高计算速度，保证了收敛性。

分负荷的操作时间取决于电网备用通道的投入时间、解环点的断开时间等。根据现场经验，单一线路投入运行时间大多在 1 min 到 5 min 范围内。上海电力公司曾做过统计，部分相邻分区间具备 20 min 转供 380 MW 负荷的能力[5]。当电网某个紧急状态可忍受的时间大于这个时间尺度时，就有选择采用分负荷解决的空间。

2.1. 变压器过载

当监测到变压器上的功率超过其额定功率时，可以判定系统存在过载。变压器发生过载时，可以通

过分负荷技术来消除过载或减弱过载程度。

当第 j 个设备为变压器时，变压器各绕组的过载安全裕度如式 1 所示。

$$\eta_{j,w} = \left(1 - \frac{S_T/U_T}{S_P/U_{N,w}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, w 表示变压器的不同绕组; $U_{N,w}$ 为绕组的额定电压。 S_T 和 U_T 为绕组当前状态下的视在功率和电压, S_P 为正常条件下变压器的允许容量。变压器设备的过载安全裕度为所有绕组中过载安全裕度的最小值。

由油浸式电力变压器负载导则可知, 当环境温度为 40°C , 正常寿命内的 220 kV 油浸式变压器过载率及时间如表 1 所示。

由表 1 看出, 对于 220 kV 油浸式变压器, 当变压器过载率大于 0%, 小于等于 75%, 此时变压器可连续运行时间超过 20 min, 满足采取分负荷的时间尺度。即过载安全裕度大于等于 -0.75, 小于 0 时, 启动分负荷。当变压器过载率大于 75%, 此时变压器可连续运行时间小于 20 min, 不满足采取分负荷的时间尺度。即过载安全裕度小于 -0.75 时, 启动切负荷。讨论变压器过载问题时, 本文以 220 kV 油浸式变压器为例。若具体问题中的变压器为其他型号, 则根据其过载时的允许运行时间表重新确定启动判据。

2.2. 线路过载

当监测到线路上流过的电流超过其额定电流可以判定系统存在过载。线路发生过载时, 可以通过分负荷技术来消除过载或减弱过载程度。

紧急状态下, 当第 j 个设备为线路时, 选取线路两端电流较大一端的电流计算过载安全裕度, 如式 2 所示。

$$\eta_j = \left(1 - \frac{I_T}{I_N} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, I_T 为紧急状态下线路电流, I_N 为线路额定电流。

目前国内 500 kV 输电线路的导线, 一般采用 LGJ-400/35 型导线。文献[6]中, 作者绘制出常用导线短时过载电流曲线, 根据图得出的内容如表 2。

根据表 2 可知, 当环境温度 35°C , LGJ-400/35 型导线起始温度为 40°C 时, 线路过载程度越大, 则其允许过载的时间越短。当线路过载率大于 0%, 小于等于 10%, 此时线路可连续运行时间超过 20 min, 满足采取分负荷的时间尺度。即过载安全裕度大于等于 -0.1, 小于 0 时, 启动分负荷。当线路过载率大于 10%, 此时变压器可连续运行时间小于 20 min, 不满足采取分负荷的时间尺度。即过载安全裕度小于 -0.1 时, 启动切负荷。讨论线路过载问题时, 本文以 LGJ-400/35 型导线为例。若具体问题中的导线为其他型号, 则根据其过载时的允许运行时间表重新确定启动判据。

2.3. 电压越限

母线电压持续降低, 直到低于限值, 称为电压越限。电压越限很多情况下是由于重负荷或者系统无功功率不足导致的。对于 220 kV 以上电压等级电网, 电压标么值在 0.9~1.1 的范围内是允许的。当系统电压标么值为 0.8~0.9 之间时, 此时系统仍可长时间运行, 满足采取分负荷技术的条件。当电压标么值低于 0.8 时, 低压减载装置动作。

当第 k 条母线出现低电压越限时, 低压安全裕度如式 3 所示。

$$\lambda_k = \left(\frac{V_T}{V_N} - V_{thres} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Table 1. 220 kV oil-immersed transformer overload rate and schedule

表 1. 220 kV 油浸式变压器过载率及时间表

过载率(%)	允许过载时间(min)
20	480
30	120
45	60
60	45
75	20
100	10
140	3.5
200	1.5

Table 2. The running time of LGJ-400/35 wire when it overloaded

表 2. LGJ-400/35 型导线过载时的允许运行时间

过载率(%)	允许过载时间(min)
4	30
6	25
10	20
19	15
30	10

式中, V_T 为当前状态下第 k 条母线的电压, V_N 为该母线的额定电压, V_{thres} 为判断出现低压越限的阈值, 一般可取为 0.9。

当低压安全裕度大于等于 -0.1, 小于 0 时, 采取的措施包括投退电容电抗器、调整变压器分接头等措施, 若还未解决紧急状态则启动分负荷。当低压安全裕度小于 -0.1 时, 启动切负荷。

3. 基于灵敏度分析法的方案综合性能指标

$$\omega_i = p_i + q_i \tag{4}$$

$$p_i = \sum_{j=1}^N [S_{i,j} (1 - \eta_j)] \tag{5}$$

$$q_i = \sum_{k=1}^M [H_{i,k} (\lambda_k + V_{thres})] \tag{6}$$

式中, ω_i 为投入第 i 个方案后的综合性能指标, 此指标综合考虑了投入第 i 个方案后解决过载和电压越限的能力; p_i 为投入第 i 个分负荷方案后的消除过载的能力; N 为当前状态下过载设备的总数; $S_{i,j}$ 为采用第 i 个分负荷方案后, 第 j 个设备的过载安全裕度变化量; q_i 为投入第 i 个分负荷方案后的消除低电压越限的能力; M 为当前状态下低压越限母线的总数; $H_{i,k}$ 为采用第 i 个分负荷方案后, 第 k 条母线的低压越限裕度变化量; V_{thres} 为判断出现低压越限的阈值, 一般可取为 0.9。

设置综合性能指标的阈值 $\omega_{i,thr}$, 综合性能指标大于阈值的分负荷方案可以考虑, 此时采取的分负荷方案能解决紧急状态, 否则淘汰。不同算例中的阈值不同, 当综合性能指标正好为阈值时, 恰好能解决紧急状态。

4. 分负荷自动搜索方法流程

对于解决紧急状态下的电压越限和过载问题的分负荷方案来说，制定合理的方案可选空间能简化分负荷方案自动搜索算法。可选方案要遵循的原则如下：

1) 线路为 220 kV 已建线路，且闭合与处于停运且检修结束状态的设备直接相连的开关刀闸组就能够将线路投入运行。

2) 投运的线路直接相连的节点与紧急状态的设备直接相连的节点属于同一个电气岛。

3) 开合方案需保证供电可靠性。

4) 系统中各断路器的开断会产生开断磨损，而开断磨损是影响其使用寿命的重要因素，因此分负荷操作有一定的开关操作代价。在其他指标相同的情况下操作次数越少，分负荷方案越优。所以本文中设置方案投运的线路条数为 2 条。

紧急状态下的分负荷方案自动搜索方法流程如图 1 所示。

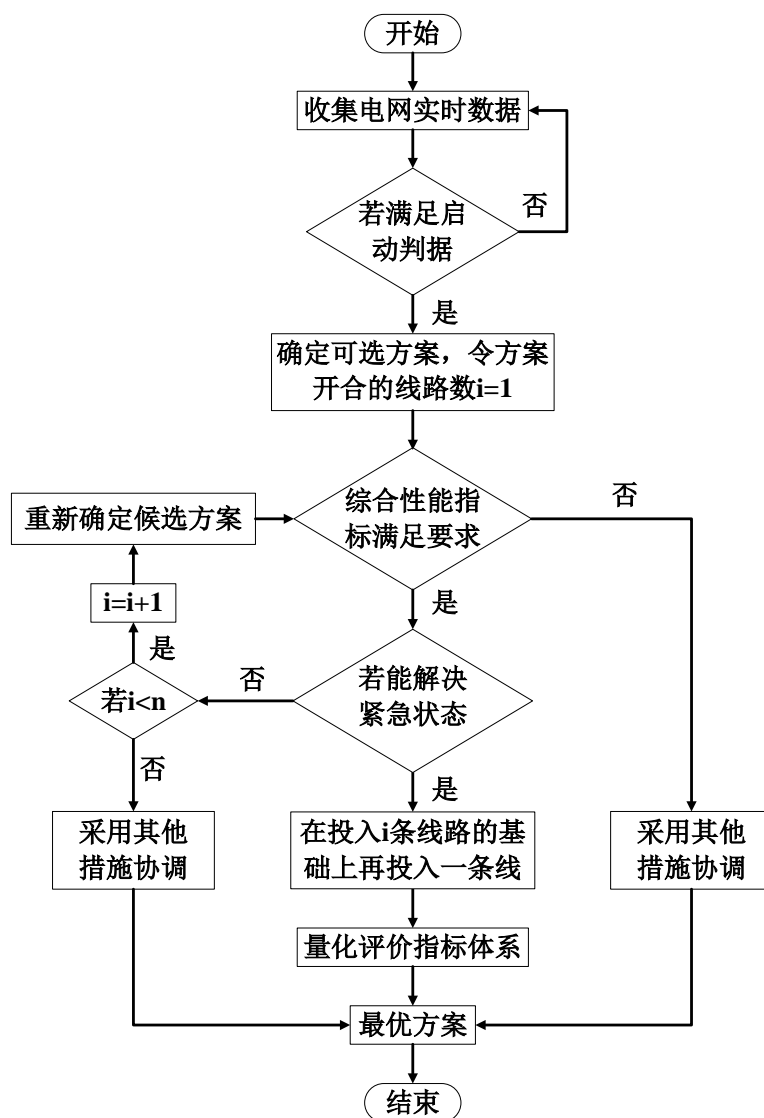


Figure 1. The flow chart of the search method of load division program

图 1. 分负荷方案自动搜索方法流程图

计算步骤如下:

步骤 1: 监测电网实时过载和电压越限数据, 如果满足启动判据, 则启动分负荷, 进入步骤 2;

步骤 2: 需要考察的发生单一紧急状态问题的设备加入到考察集中。根据考察集确定可选方案空间, 方案开合的线路条数为 $i = 1$, 进入步骤 3;

步骤 3: 针对可选方案空间中各个方案, 计算投入 i 条线路时, 各个方案的综合性能指标, 将综合性能指标大于阈值值的方案按综合性能指标的大小从高到低排序。这些指标加至待校核方案集中, 若待校核方案集为空, 则进入步骤 8; 否则, 进入步骤 4;

步骤 4: 将待校核方案集中能解决紧急状态的方案移至可行方案集中, 进入步骤 5。若待校核方案集中的方案都不能解决紧急状态, 即可行方案集为空, 进入步骤 6。

步骤 5: 在投入 i 条线路的候选方案的基础上, 继续计算增加一条线路时, 各个方案的综合性能指标。若其综合性能指标不满足要求, 则淘汰该方案, 否则将该方案加至可行方案集中。进入步骤 7。

步骤 6: 此时投入 i 条线路时, 均无法满足要求, 则必须再增加一条线路。此时将待校核方案集中综合性能指标最大的线路作为已投运线路, 并在此基础上继续通过综合性能指标来筛选候选方案, 即后续筛选出的候选方案里会包含该条线路。若 $i < n$ (n 为可开合线路的上限), 令 $i = I + 1$, 进入步骤 3, 否则进入步骤 8。

步骤 7: 利用量化评价指标体系对所得到的可行方案集中的所有方案进行综合评价, 选取最优方案。由于分负荷改变了电网的拓扑结构, 会影响电网的经济性、安全性、可靠性。所以分负荷方案量化指标体系是必不可少的, 但由于篇幅的问题, 本文中就不提及了。

步骤 8: 采取其它措施与待校核方案集中的方案进行协调。选择待校核方案中性能指标最高的方案与切负荷协调, 从而解决设备单一紧急状态, 得到最优方案。分负荷与其他措施的协调, 由于篇幅的问题, 本文中就不提及了。

5. 算例分析

以某区域电网为例, 研究通过分负荷技术解决负荷中心低电压问题。该电网在正常运行情况下和某条线路检修情况下, 电网各参数均处于正常运行范围内, 没有出现紧急状态。当检修状态下, 某双回线发生故障切除事件时, 部分负荷节点会出现低压越限的紧急状态, 需要采取负荷转供措施解决, 此时共有 4 条处于停运状态线路可供投运。

电力系统正常运行时, 利用 PSD-BPA 电力系统分析软件进行潮流计算。该电力系统分析软件工具计算规模大、速度快、数值稳定性好、界面友好、功能强大, 已在我国电力系统规划、调度、生产运行、科研部门以及高校科研教学中得到了广泛的应用。得到正常情况下, 各母线电压和线路、变压器负载均在允许范围内, 未出现过载和电压越限情况。在正常情况下, 该系统 1 分区, 2 分区, 3 分区的地理接线图如图 2 所示。

当系统中 CTO-21 与 LZ-21 两站之间的线路检修时, 计算得到各母线电压和线路、变压器负载均在允许范围内, 未出现过载和电压越限的情况。但当检修的同时, FZ-21 与 LZ-21 两站之间的两条线路都因故障而跳开时, 计算得到, 两条母线出现低电压越限情况: HJ-21 站额定电压为 230.0 kV, 有名值为 203.26kV, 标幺值为 0.8838 p.u.; LZ-21 站额定电压为 230.0kV, 有名值为 206.69 kV, 标幺值为 0.8986 p.u.。线路负载最严重的为 CTO-21 站与 LZ-21 站之间的线路, 其负载率为 95.5%; 变压器负载最严重的为 SK-21 与 SK-51 之间的变压器, 其负载率为 97.4%。此时, 线路、变压器负载均在允许范围内, 未出现越限情况。但母线电压出现了低压越限情况。

1) 采取切负荷

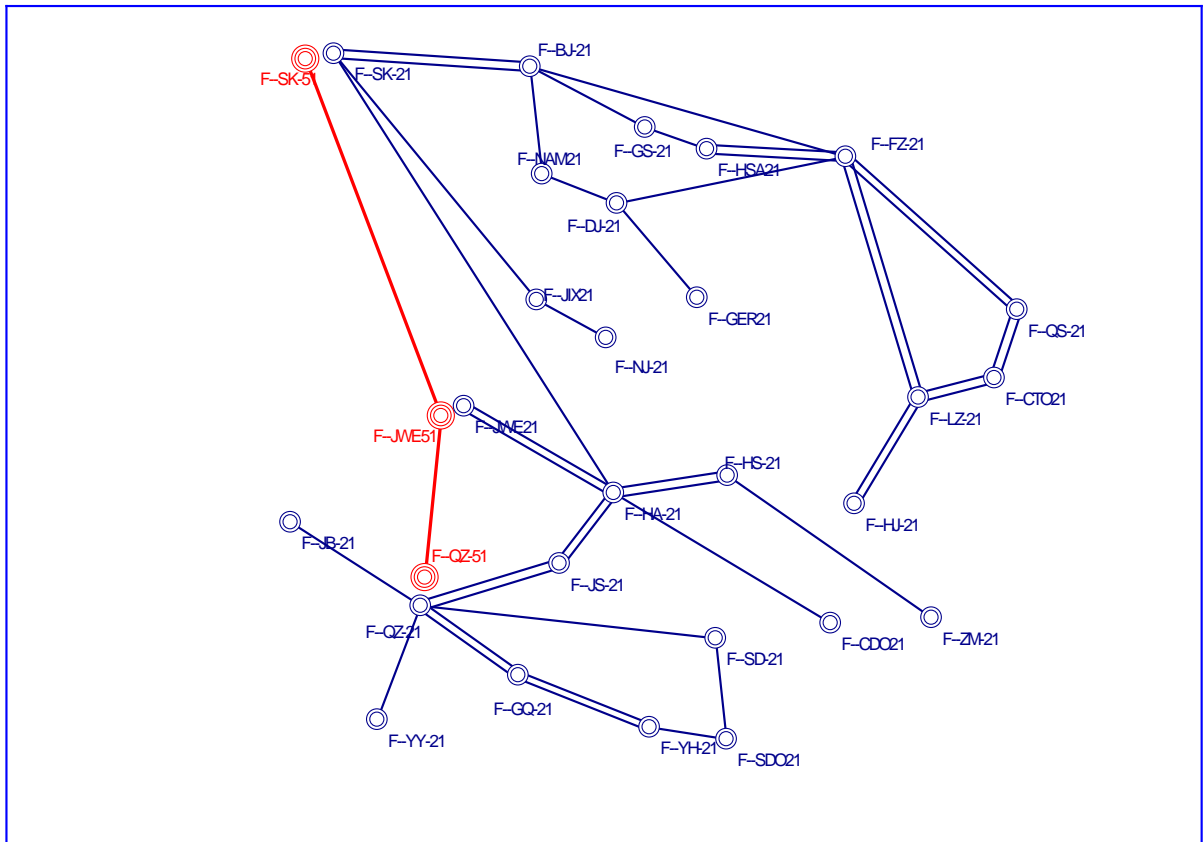


Figure 2. Geographical wiring diagram under normal state

图 2. 正常情况下的地理接线图

在该紧急状态下，只有 HJ-21 站和 LZ-21 站出现低压越限，绘制地理接线图，发现 HJ-21 站负荷功率全部由 LZ-21 站到 HJ-21 站之间的线路供应。当 HJ-21 站切除 40 MW 有功功率，12 MVar 无功功率时，系统恰好消除其紧急状态，且此时系统切负荷量最小。电网公司切负荷赔偿取 700 元/MW·h，系统恢复时间取为 2 h，故在该紧急状态下，电网切负荷赔偿款为 5.6 万元；切负荷点所在市减供负荷比例为 7.81%，尚未构成一般事故，事故等级罚款为 0。所以，在该紧急状态下，切负荷措施总的经济代价为 5.6 万元。

2) 采取分负荷

紧急状态下，系统中存在四条线路可以投入，分别是：

线路一：连接 HJ-21 与 HS-21 双回线中的一条；

线路二：连接 HJ-21 与 HS-21 双回线中的一条；

线路三：连接 NJ-21 与 LZ-21 间线路；

线路四：连接 HA-21 与 GQ-21 间线路；

这些线路作为自动搜索算法筛选候选方案的基础。

经研究，在低压问题中至少投运 1 条线路即可满足要求，因此只筛选投运 1 条和 2 条线路时的分负荷方案。

在该紧急状态下，当仅投运 1 条线路时，各方案的综合性能指标从大到小如表 3 所示。

比较以上四种方案可知，方案三和方案四综合性能指标未达到要求，未能完全消除紧急状态，而方案一和方案二中，综合性能指标达到要求，HJ-21 站和 LZ-21 站母线电压都回升进入允许范围内，消除了紧急状态。因此，经过分负荷方案自动搜索算法可以将方案三和方案四淘汰掉，方案一和方案二满足

Table 3. Every load division program comprehensive performance when one line puts into operation
表 3. 投运 1 条线路时, 各分负荷方案综合性能指标排序表

方案序号	投运线路	是否解决紧急状态	综合性能指标
一	线路一	是	0.0707
二	线路二	是	0.07025
三	线路三	否	0.02656
四	线路四	否	0.00026

Table 4. Every load division program comprehensive performance when two lines put into operation
表 4. 投运 2 条线路时, 各分负荷方案综合性能指标排序表

方案序号	投运线路	是否解决紧急状态	综合性能指标
五	线路一+线路二	是	0.07799
六	线路一+线路三	是	0.07275
七	线路二+线路三	是	0.07239
八	线路二+线路四	是	0.07194
九	线路一+线路四	是	0.0713

要求, 可以作为可行方案。在线路一或线路二的基础上再投运一条线路, 构成其他方案, 计算其综合性能指标。在该紧急状态下, 当投运 2 条线路时, 各方案的综合性能指标由大到小排序如表 4 所示。

选择综合性能指标最高的方案, 即投入线路一和线路二。此时采用分负荷就能解决紧急状态, 不需要采用切负荷。

6. 结论

本文从分负荷技术能解决的电网紧急状态着手, 提出分负荷方案自动搜索算法。本文的创新点和研究成果如下:

- 1) 本文提出的启动判据实质上是一种启发式方法, 可以区分紧急状态的类型和紧急状态的程度, 因而可以直接判定选用分负荷或切负荷措施, 缩小了最优解的搜索空间, 提高计算速度, 保证了收敛性。
- 2) 本文以基于灵敏度分析法, 快速地获得满足要求的分负荷方案。
- 3) 对于某些对时间要求不高的紧急状态, 采用分负荷技术能减少甚至不需要切负荷。

基金项目

国家电网公司科技项目“适应智能化发展需求的电网安全和充裕控制技术研究与应用”。

参考文献 (References)

- [1] 刘楠, 唐晓骏, 张文朝, 等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 131-136.
- [2] 胡飞虎, 李威, 冯轩, 等. 基于不同目标的电网分区域调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 22-28.
- [3] 白宏坤, 李干生. 关于电磁环网弱开环方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 60-64.
- [4] 宋洪磊, 吴俊勇, 吴林峰. 电力系统紧急情况下的动态分区和自主解列策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 224-230.
- [5] 周晓宁, 徐伟, 胥传普, 等. 计及负荷转供措施的电网设备过载辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 61-66.
- [6] 李庆先, 唐自强, 李广福. 导线短时过载电流计算的探讨[J]. 福建电力与电工, 2006(1): 17-19.

再次投稿您将享受以下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>