

DOI: 10.7667/PSPC152061

# 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究

李兆伟<sup>1</sup>, 刘福锁<sup>1</sup>, 崔晓丹<sup>1</sup>, 李威<sup>1</sup>, 王燕君<sup>1</sup>, 王珂<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 211106; 2. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620)

**摘要:** 国务院 599 号令明确了稳控系统切负荷等同于故障损失负荷。区域切负荷比例过高会导致严重的电网安全事故等级和事后追责。研究通过动态调整电网分区结构解决部分对控制时间要求不高的紧急状态以减少控制切负荷量非常必要。当存在多个动态分区方案可以解决电网紧急状态时, 采用多目标决策从备选方案中选择最优动态分区方案。当仅依靠动态分区技术不能解决电网紧急状态时, 为降低电网损失, 需要在计及电力安全事故风险的前提下考虑动态分区与紧急切负荷措施协调配合。通过实际电网算例验证, 采用计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制, 可在保证系统安全的前提下, 减小负荷损失量, 降低电网整体电力安全事故等级。

**关键词:** 动态分区; 切负荷; 电力安全事故风险; 紧急控制

## Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk

LI Zhaowei<sup>1</sup>, LIU Fusuo<sup>1</sup>, CUI Xiaodan<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WANG Yanjun<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>2</sup>

(1. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau Ltd., Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** The Ordinances of Electrical Security Accident Emergency Disposal and Investigation published by State Council has made it clear that load shedding in the stability control system equals to load loss in the system fault. The excessively high ratio of area load shedding may result in severe accidents of high level in the power grid and responsibility should be taken after the accident. Hence the study of solving the problem of some emergencies which have low demand of time control by adjusting the divisional structure of the grid dynamically to decrease the load shedding amount is very necessary. When there are more than one dynamic divisional proposal to deal with the emergency, optimal one with multi-objective optimization should be taken. When the emergency cannot be solved only by dynamic divisional technology, to reduce the loss of the grid and consider the electric safety accidents, the coordination between dynamic division and the measurement of emergency load shedding should be taken into account. According to the simulations of actual cases, under the guarantee of safety system, the decrease of load loss and lower level of electrical accident can be true by adopting the coordination between dynamic division of the grid and load shedding.

This work is supported by Science and Technology Project of Guangzhou Power Supply Bureau and State Grid Science and Technology Project “Research and Development Application of Muliti-regional Safety and Control System Coordination and Online Diagnosis and Assistant Decision Technique”.

**Key words:** dynamic division; load shedding; electrical security accident risk; emergency control

## 0 引言

紧急切负荷是我国电网安全稳定防御技术体系中的一项重要措施, 通过在电网紧急状态下实施切

负荷可以解决功角、电压、频率及过载等稳定问题。国务院第 599 号令《电力安全事故应急处置和调查处理条例》(以下简称《条例》), 明确了稳控系统切负荷等同于故障损失负荷, 当稳控切负荷导致局部电网损失负荷达到一定比例时同样会触发《条例》, 电力生产运行单位需承担相应的电力安全事故责任。《条例》的实施要求我们在保障电网安全稳定运行的前提下, 一方面应加强稳控系统管理和优化

基金项目: 广州供电局科技项目(GZM2014-2-0027); 国家电网公司科技项目“多区域安控系统协调及在线诊断、辅助决策技术研发应用”

配置,识别配置稳控系统带来的风险<sup>[1]</sup>;另一方面对一些控制时间要求不高的紧急状态,积极探寻替代措施,在保证电网安全的前提下减少负荷损失<sup>[2]</sup>。

分层分区运行是电网的发展趋势,《电力系统安全稳定导则》(以下简称《导则》)明确规定:随着高一级电压电网的建设,下级电压电网应逐步实现分区运行,相邻分区之间互为备用。目前国内省级电网已基本实现分层分区运行,相邻分区之间存在着部分备用联络通道用于电网事故后支援<sup>[3-7]</sup>。但这些备用通道如何使用,使用后对电网会造成何种影响鲜有研究。动态分区是指利用不同分区间的备用联络通道在电网紧急状态下动态地调整分区结构和供电范围,可用的措施包括备用联络通道投入、电磁环网的开环以及负荷转供等。利用动态分区技术可调整电网的潮流分布,合理的动态分区可以解决或缓解电网紧急状态,减少紧急切负荷量,进而降低电力安全事故风险。文献[8]采用多目标优化方法对电网规划阶段静态分区方案进行优化,但不能适应电网紧急状态下动态分区的需求。文献[9]提出了负荷转供辅助解决电网设备过载问题,可减少发电机调整量和卸负荷量,初步将负荷转供应用到紧急控制中,但对负荷转供与切负荷的协调,尤其是电力安全事故风险约束下的协调优化控制并未考虑。

本文从应用电网动态分区技术能解决的电网紧急状态着手,进而分析动态分区对电网安全稳定特性的影响,在此基础上建立动态分区方案的评价指标,当存在多个动态分区方案可以解决电网紧急状态时,基于建立的评价指标采用多目标优化从备选方案中选择最优动态分区方案;当仅依靠动态分区技术不能解决电网紧急状态时,则考虑与紧急切负荷等措施协调配合,根据动态分区操作的综合性能指标及计及电力安全事故风险的切负荷性能代价比进行策略寻优,最终给出满足系统安全稳定要求的协调控制措施。

## 1 动态分区技术应用场景

电网动态分区是一种特殊的运行方式调整,它通过改变网络拓扑结构或负荷分布来改变电网中的潮流分布,进而达到改善电网运行状态的目的。由于动态分区调整一般是通过开关操作实现的,有一定的时延性,因此对于控制时间要求较高的电网紧急状态,如功角失稳、电压失稳、频率失稳等,不宜采用。而对于过载、电压频率越限、断面功率越稳定极限等允许一定时延的紧急状态可以考虑通过动态分区来减少切机、切负荷措施。

动态分区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、主变低压侧开关的短时并解操作等,根据现场经验,单一线路投入运行时间大多在 1~5 min 范围内,负荷转供时间与转供容量及转供分区间的供电拓扑有关,上海电网曾做过统计,部分相邻分区间具备 20 min 转供 380 MW 负荷的能力<sup>[10]</sup>。当电网对某个紧急状态可忍受的时间大于这个时间尺度时,就有选择动态分区解决的空间。

众所周知,电网设备元件允许短时过载时,对有功(电流)和时间有严格的要求,一般来说过容量越大,其允许过载时间越短。如对于 220 kV 油浸式变压器,过载 30%情况下允许连续运行 2 h,而过载 100%情况则连续运行不超过 10 min。国内 220 kV 输电线路中大量采用的 LGJ-400/35 型导线,当过载电流达到 800 A 时,允许连续运行 30 min,而当过载电流达到 1 050 A 时,其允许连续运行时间不超过 10 min。因此,当电网设备元件过载程度较小时,有较为充足的时间通过动态分区操作进行解决,减少或避免采用切负荷措施。

《导则》规定,对于 220 kV 以上电压等级电网,允许的电压偏差值不应大于额定电压的 10%,即用户允许的电压应在 0.9~1.1 p.u.。考虑电网极端严重故障,电网中配置的低电压减载装置动作电压定值一般低于 0.8 p.u.,当系统电压降至 0.8~0.9 p.u.时,低压减载装置一般不会动作,此时系统仍可长时间运行,但其抵抗扰动的能力减弱,一般可采取投退电容电抗器、调整变压器分接头等措施使其电压回升。当仍不能解决问题时,甚至会采用切负荷措施。由于这类场景允许较长的连续运行时间,可以考虑采用动态分区解决,但一般仅可解决备用通道或解环点附近站点的电压越限,对于整个分区的电压越限,控制效果有限。

对于因严重故障造成分区电网与主网解列,同时分区电网频率偏移又未达到低频减载或高频切机动作定值的情况,也可以考虑使用动态分区操作维持电网频率安全。

与切负荷措施相比,利用动态分区操作来解决上述电网紧急状态时,具有控制代价小的优点,但动态分区操作改变电网的拓扑结构,需要分析其对电网稳定特性的影响。

## 2 动态分区对电网稳定特性的影响及优化

动态分区通过开合环等操作改变电网的拓扑结构,会改变系统中的潮流分布,进而改变系统的网络损耗以及安全稳定特性。由于涉及电磁环网开合环,还可能对系统短路电流造成较大影响。另外,

分区间的负荷转移会对分区主变的容载比以及电网中末端负荷容量造成影响<sup>[11-12]</sup>。恰当的动态分区方案会缓解设备过载、电压越限、频率偏移等问题的程度,从而减少或避免切负荷措施的使用。

综上所述,动态分区会对电网的经济性、安全性和可靠性造成影响,为了充分评价不同动态分区方案的优劣程度,需建立涵盖电网经济性、安全性、可靠性的评价指标,本文在研究静态分区评价工作的基础上<sup>[8]</sup>,采用如表1指标评价动态分区。

表1 动态分区评价指标

Table 1 Index system of dynamic division		
指标类别	评价指标	指标说明
经济性	网损	潮流分布改变后的网络损耗
	操作次数	反映执行动态分区的操作代价
安全性	短路电流	校验电网拓扑改变的造成影响
	安全裕度	反映紧急状态的解决程度
可靠性	容载比	动态分区后各分区的负载率
	末端负荷容量	反映处于系统末端的供电容量

与笔者在文献[8]中提出的静态分区指标相比,经济性指标增加了操作代价,安全性指标增加了安全裕度指标。断路器开断会产生开断磨损,是影响其使用寿命的重要因素,因此动态分区操作有一定的开关操作代价,简单起见,忽视不同电压等级、不同类型开关的操作代价差异,以开关操作次数来评估操作代价,在其他指标相同的情况下操作次数越少,动态分区方案越优。由于动态分区是作为电网紧急状态解决措施实施的,因此需将紧急状态的解决程度作为指标,视解决的问题可选择过载安全裕度、电压安全裕度或频率安全裕度。

由此可见动态分区方案优化是一个多目标决策问题,当电网发生预想故障处于紧急状态时,通过离线分析存在多个可行的动态分区方案可以解决该问题时,为选择优化方案,需采用多目标决策方法进行优选,笔者在文献[8]中采用TOPSIS法对静态分区方案进行优化,其优化过程可以应用于动态分区方案的优化,在此不再赘述。

### 3 计及电力安全事故风险的动态分区与切负荷协调控制

通过动态分区解决电网紧急状态可以减少稳控切负荷措施配置,但当所有可用动态分区方案均无法解决预想故障下的紧急状态时,需要考虑动态分区与切负荷进行协调配合,在保证电网安全稳定的前提下,减少稳控切负荷量,降低或避免电网运行部门承担的电力安全事故责任,使电网控制代价最小。

#### 3.1 电力安全事故风险对稳控切负荷配置的影响

《条例》明确了稳控系统切负荷等同于事故损失负荷,对不同规模的电网根据不同的负荷减供比例定义了相应的电力安全事故等级,并规定了相应的事故责任罚款,因此考虑电力安全事故风险后,切负荷措施的代价除了包括停电损失的费用,还包括电力安全事故责任代价,可用式(1)表示。

$$F = F_1 + \beta F_2 \quad (1)$$

式中: $F_1$ 为切负荷造成负荷损失的的经济代价,通常用单位停电费用损失乘以期望缺供电量来计算,单位停电费用损失包括电力企业的停电损失代价和因停电造成的社会经济损失的赔偿代价,主要衡量方法有用户函数法、基于资本投资法和基于国民生产总值法; $\beta$ 为责任代价 $F_2$ 的权重系数,若考虑经济代价和责任代价权重相同, $\beta$ 可取为1。针对不同规模的电网 $F_2$ 有不同的表达形式,但总体来说, $F_2$ 是相应地区电网减供负荷比例 $\alpha$ 的分段函数,如,对于电网负荷5 000 MW以上20 000 MW以下的省、自治区电网,责任代价函数制定如下:

$$F_2 = \begin{cases} 10 + 10 \frac{(\alpha - 6\%)}{(12\% - 6\%)}, & \alpha \in (6\%, 12\%] \\ 20 + 30 \frac{(\alpha - 12\%)}{(16\% - 12\%)}, & \alpha \in (12\%, 16\%] \\ 50 + 150 \frac{(\alpha - 16\%)}{(40\% - 16\%)}, & \alpha \in (16\%, 40\%] \\ 200 + 300 \frac{(\alpha - 40\%)}{(100\% - 40\%)}, & \alpha \in (40\%, 100\%] \end{cases} \quad (2)$$

因此,考虑电力安全事故风险后,电网切负荷的控制代价增加了责任代价,且由于责任代价离散分段函数的特点,给措施的协调优化带来了困难。

#### 3.2 计及电力安全事故风险的动态分区与切负荷协调控制方法

理论上来说,动态分区与切负荷协调优化方案应满足 $\min(F)$ ,即综合考虑动态分区和切负荷协调后切负荷措施造成控制代价最小,考虑到切负荷量与所采用的动态分区操作密切相关,而不同动态分区操作有明显的离散性和非线性,因此很难采用常规的优化方法给出最优解。工程上可以将动态分区与切负荷解耦处理,通过不同动态分区操作的综合控制性能指标选择动态分区操作,在此基础上计及电力安全事故风险根据不同切负荷点的性能代价迭代进行切负荷,直至满足系统安全稳定要求,给出计及电力安全事故风险的动态分区与切负荷协调优化措施,图1给出了计及电力安全事故风险的

动态分区与切负荷协调优化方法流程图，为便于说明，以解决过载紧急状态为例说明动态分区技术的应用，电压、频率及断面功率越限问题只是在评价指标方面略有不同，相应的优化方法基本相同，不再赘述。

该方法的基本思路是，根据预想故障下设备的过载安全裕度，确定最大可用动态分区操作数，在最大操作数约束下校核综合控制性能满足要求的各动态分区操作执行后是否能解决预想故障下的设备过载，若能解决，则从中根据多目标决策方法选择最优的动态分区操作组合方案；若不能解决，则选择综合控制性能最好的动态分区操作组合，在此基础上计算各备选切负荷点计及电力安全事故风险的切负荷性能代价比，迭代切除性能代价比最高的负荷直至预想故障下的过载问题解决。

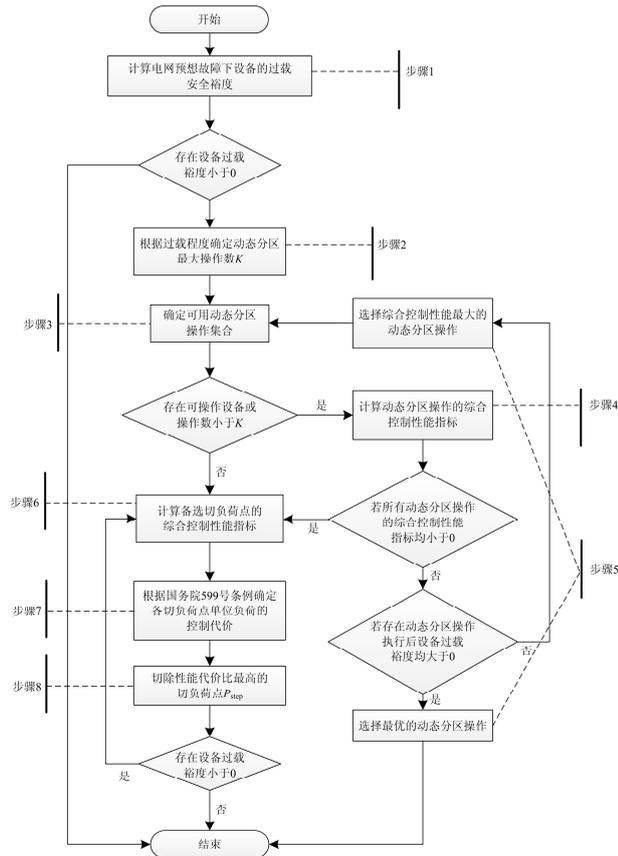


图 1 动态分区与切负荷协调控制方法

Fig. 1 Coordinate control method for dynamic division and load shedding

具体的方法流程如下所述。

步骤 1：计算当前方式下电网发生预想故障后设备的过载安全裕度，若存在过载设备则进入步骤 2，否则结束本方法。

步骤 2：根据设备的过载程度确定动态分区操作的最大操作数  $K$ ， $K$  与设备不同过载程度可连续运行的时间有关，考虑到工程上动态分区操作下电网运行的可靠性， $K$  取值不超过 3。

步骤 3：根据电网中不同分区间备用通道、开合环点的运行情况等确定可用动态分区操作空间，若不存在可用动态分区操作或动态分区操作数大于等于  $K$ ，则进入步骤 6，否则进入步骤 4。

步骤 4：通过短路电流计算，忽略会导致短路电流超标的动态分区操作，通过潮流计算，计算不同动态分区操作的综合控制性能指标  $F_t$ ，由式(3)计算可得。

$$F_t = \sum_{j=1}^{Num+P_t} (\eta'_{j,t} - \eta_j)(1 + \eta'_{j,t}) \quad (3)$$

式中： $\eta'_{j,t}$  为第  $t$  个动态分区操作实施后第  $j$  个过载设备的过载安全裕度； $\eta_j$  为动态分区操作实施前对应设备的过载安全裕度； $Num$  为动态分区操作前过载设备个数； $P_t$  为动态分区操作执行后新增过载设备个数。

步骤 5：若存在多个动态分区操作执行后可以解决系统过载问题，则根据多目标优化方法选择最优方案结束本方法，否则选择综合控制性能最大的动态分区操作，返回步骤 3。

步骤 6：利用功率摄动法计算备选切负荷点解决设备过载的综合灵敏度  $\sigma_m$ ，由式(4)计算可得

$$\sigma_m = \frac{1}{Num \cdot \Delta P_m} \sum_{j=1}^{Num} \Delta P_{ol,j} \times (1 - \eta'_j) \quad (4)$$

式中： $\Delta P_m$  为负荷点  $m$  的功率摄动量； $\Delta P_{ol,j}$  为第  $j$  个过载设备功率波动量； $\eta'_j$  为切负荷操作前第  $j$  个过载设备的过载安全裕度。

步骤 7：计算各切负荷点考虑电力安全事故等级的单位负荷控制代价  $C_{pm}$ ，可由式(5)计算可得

$$C_{pm} = \frac{F_m}{P_m} \quad (5)$$

式中： $F_m$  为切负荷措施代价，可由式(1)计算可得； $P_m$  为当前切负荷点的切负荷总量。

步骤 8：计算各切负荷点的切负荷综合性能代价比，由式(6)计算获得。

$$S_m = \frac{\sigma_m}{C_{pm}} \quad (6)$$

根据各切负荷点的性能代价比排序选择切负荷点，直至过载紧急状态解决，给出该预想故障下的控制措施，结束本方法。

本方法在解决预想故障下的过载问题时, 综合考虑动态分区及切负荷协调控制, 执行切负荷时考虑了电力安全事故风险带来的责任处罚代价, 可有效降低或消除切负荷解决过载问题时带来的电力安全事故责任, 策略寻优根据动态分区操作的综合控制性能及切负荷措施的性能代价比, 是一种工程实用方法。

#### 4 算例分析

以实际某特高压直流落点近区电网为例验证本文所提方法在保障系统安全稳定、减少事故后切负荷量、降低电力安全事故等级方面的有效性, 电网简图如图 2 所示。

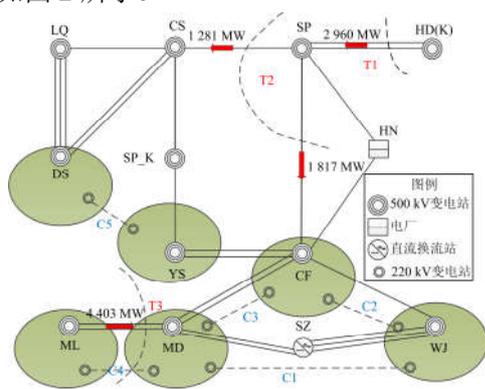


图 2 某实际特高压直流落点近区电网简图

Fig. 2 Diagram of an UHVDC near region actual grid

其中 SZ 换流站为特高压直流逆变站, 直流双极高端满送时落地约 670 万 kW, 图中实线为 500 kV 线路, MD、WJ、CF 为三个负荷中心分区, 系统全接线方式下 HD(K)-SP 双线断面(记为断面 T1)稳定限额 240 万千瓦, SP-CS+SP-CF 双线断面(记为断面 T2)稳定限额 260 万千瓦, ML-MD 双线断面(记为断面 T3)稳定限额 300 万千瓦, 正常运行方式下各断面功率均在稳定限额内, 若发生特高压直流双极闭锁故障, 巨大的功率缺额将导致近区潮流重新分布, 断面 T1、T2、T3 功率均超稳定限额, 故障后潮流情况如图 1 所示, 为保证故障后各断面功率不超稳定限额, 需采取紧急控制措施。若仅采用切负荷措施, 计及电力安全事故风险采用式(6)计算不同负荷站点切负荷的性能代价比, 仿真得到 MD、WJ、CF 三个分区各负荷站点对解决断面 T1、T2、T3 功率越限的综合性能代价基本相同, 且远大于其他分区负荷站点, 由此给出仅采用切负荷措施, 计及电力安全事故风险的优化控制方案下切负荷量及电网事故等级如表 2 所示。

需要指出各分区的切负荷总量为各分区内根据综合性能代价比寻优后所选择的 220 kV 站点的切

表 2 计及电力安全事故风险的切负荷方案及效果

Table 2 Load shedding scheme and effects considering ESAR

分区	切负荷量/MW	切负荷比例(%)	分区事故等级
MD	2 190	57.9	较大事故
CF	702	29.3	一般事故
WJ	1 191	34.5	一般事故

负荷量之和, 限于篇幅不详细列出各 220 kV 站点切负荷量。由此可见, 为保证系统安全即使在计及电力安全事故风险前提下考虑切负荷优化布点仍需承担较高的电力安全事故责任代价。为减少系统切负荷量, 考虑到断面功率越限对控制时间要求不高, 可采用动态分区与切负荷协调。经确定实际电网中仅有如图 2 中 C1、C2、C3 三个备用通道可用, 均为 MD、WJ、CF 内部备用通道, 计算其对于解决断面 T1、T2、T3 功率越限问题的综合控制效果近似为 0。为说明动态分区操作的效果, 虚构 C4 和 C5 两个备用通道。经依次迭代计算, 投运 C4 和 C5 对缓解断面 T1、T2、T3 功率越限问题均有较好的综合控制性能, C4 更佳。但即使考虑 C4 和 C5 备用通道相继投运, 仍不能完全消除 3 个断面越限问题, 需要考虑与切负荷协调优化, 协调控制的切负荷方案及效果如表 3 所示。

表 3 考虑动态分区与切负荷协调控制切负荷方案及效果

Table 3 Load shedding scheme and effects with dynamic division considering ESAR

分区	切负荷量/MW	切负荷比例(%)	分区事故等级
MD	711	18.8	无
CF	792	33.1	一般事故
WJ	645	18.7	无

本方法在解决预想故障下的过载问题时, 综合对比表 3 和表 2 仿真结果可知, 考虑动态分区与切负荷协调控制该紧急状态后, 电网切负荷量大幅降低, 整体的电力安全事故责任风险也大幅下降。表 3 中 CF 分区的切负荷量较表 2 中有所增加是由于动态分区操作改变了电网的潮流分布特性, 使得各分区负荷站点的综合性能代价比发生改变造成的。但由于考虑了电力安全事故风险的约束, CF 分区的电力安全事故等级仍得到了较好的限制。仿真算例表明, 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制可以在保证电网安全稳定的前提下, 在应对部分控制时间要求不高的紧急状态时, 减少电网损失负荷量, 降低电力安全事故责任风险。

#### 5 结论

《条例》明确了稳控系统切负荷等同于故障损失负荷, 为降低电网故障后电力安全事故责任, 本文从减少电网紧急状态下负荷损失出发, 对动态分区在电

网紧急状态下的应用开展了研究,有以下成果和结论:

1) 电网动态分区操作存在固有的操作时间,对于控制时间要求较高的紧急状态,如功角失稳、电压失稳、频率失稳等,不宜采用。而对于过载、电压频率越限、断面功率越稳定极限等允许一定时延的紧急状态可以通过动态分区来减少切机、切负荷措施。

2) 动态分区会对电网的经济性、安全性和可靠性造成影响,当电网中存在多个可行的动态分区方案时,其优化选择是多目标决策问题。

3) 当仅采用动态分区无法彻底解决电网紧急状态时,需要与其他措施进行协调配合。以解决设备过载为例,本文提出了一种计及电力安全事故风险的动态分区与切负荷协调控制方法,首先选择综合控制性能最佳的动态分区操作,在此基础上计及电力安全事故风险根据不同切负荷点的性能代价比迭代进行切负荷,直至给出满足系统安全稳定要求的协调控制措施,通过在实际电网中的仿真验证了所提方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 刘福锁. 计及电力安全事故责任的稳定控制系统风险管理[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 106-110.  
LIU Fusuo. Risk management of stability control system considering electrical security accidents responsibility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 106-110.
- [2] 刘福锁, 陈涛, 李威, 等. 电网智能分负荷技术研究框架[C] // 中国电机工程学会电力系统自动化专业委员会三届一次会议暨 2011 年学会交流会, 2011 年 11 月 10~12 日, 南京.
- [3] 唐小波, 刘笠, 张娟. 基于自适应权重 Voronoi 图的配电网供电分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 83-88.  
TANG Xiaobo, LIU Li, ZHANG Juan. Method of power distribution network partition based on adaptive weighted Voronoi diagram[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 83-88.
- [4] 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.  
HU Feihu, LI Wei, FENG Xuan, et al. Research of sub-regional grid dispatching based on different objectives[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 22-28.
- [5] 冯欣桦, 黎洪光, 郑欣, 等. 计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 30-37.  
FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-37.
- [6] 陈春, 汪飒, 刘蓓, 等. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 34-43.  
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 34-43.
- [7] 苗培青, 于耿曦, 纪双全, 等. 不同量测数据情形的配电网合环操作计算及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 137-144.  
MIAO Peiqing, YU Gengxi, JI Shuangquan, et al. Calculation and application of distribution network in different situation of measurement data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 137-144.
- [8] 李兆伟, 刘福锁, 李威, 等. 基于 TOPSIS 法考虑电力安全事故风险的运行规划分负荷方案优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 71-77.  
LI Zhaowei, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Optimization of load dispatching scheme considering the risk of safety incidents based on TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 71-77.
- [9] 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.  
ZHOU Xiaoning, XU Wei, XU Chuanpu, et al. The assistant decision making for power grid equipment overloading considering load transfer actions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 61-66.
- [10] 牛凯. 上海电网分区间负荷转移分析[J]. 上海电力, 2007, 23(6): 255-258.
- [11] 马丽叶, 贾彬, 卢志刚, 等. 基于静态安全性和实时供电能力的输电网安全等级研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 229-237.  
MA Liye, JIA Bin, LU Zhigang, et al. Research on security classification of transmission network considering static security and real-time capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 229-237.
- [12] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.  
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.

收稿日期: 2015-11-26; 修回日期: 2016-03-02

作者简介:

李兆伟(1985-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: victorlee\_nari@126.com

刘福锁(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

崔晓丹(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 周金梅)