### 基于恢复价值动态评估的配电网恢复控制决策

郝丽丽1,陈从霜1,王 川1,蔡霁霖1,郝思鹏2,刘海涛2

(1. 南京工业大学 电气工程与控制科学学院,江苏 南京 211816;2. 南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:配电网停电后,停电场景、恢复进程和应急情况下的负荷职能等均会影响负荷恢复供电的紧急程度,通常根据待恢复对象自身的恢复价值静态设置其重要等级或重要度,这制约了有限恢复资源的精细化管理。 为此,考虑冷负荷启动特性与负荷间职能耦合关系对负荷单位恢复价值的影响,考虑间歇性电源出力的可控 性对电源恢复价值的影响,结合母线恢复为周边其他待恢复对象带来的潜在恢复价值,同时计及系统供电缺 额、恢复代价和恢复操作的不确定性,提出了综合恢复收益、代价和风险的负荷及电源母线恢复价值动态评 估方法。以此为基础,建立了配电网供电恢复多进程优化模型及分区并行恢复决策方法。最后,通过仿真分 析验证了所提策略能够有效提高恢复资源的利用率。

关键词:配电网;恢复价值;不确定性;动态评估;恢复控制决策

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202104024

#### 0 引言

配电网设备多、分布集中,易导致大规模停电事 故的自然灾害、网络攻击、电网设备故障、恶劣天气、 资源堵塞等对配电网的影响更大<sup>[1-3]</sup>,配电网内部的 故障停电也时有发生。通过恢复控制决策优化输电 网送电和配电网自身电源容量的分配,确定有限备 用情况下配电网各元件和设备的恢复顺序及容量, 动态指导供电恢复,这对于减少停电损失、提高电网 韧性具有十分重要的理论和实际意义。

电力系统停电后的恢复决策通常需要用待恢复 对象的重要度来引导决策或提高优化效率,通常由 专家经验或保供电级别静态确定待恢复对象重要 度<sup>[45]</sup>。待恢复对象重要度的粗糙划分制约了恢复 过程中能源的精细化管理,不利于恢复过程中充分 利用资源和获取更高恢复收益。配电网中供电缺 额、负荷的启动特性、随停电场景和持续时间而改变 的负荷同时率及失电损失、应急环境下社会的需求 等问题使恢复过程中包括容量及重要度在内的负荷 需求特性十分复杂,且随恢复过程的推进不断变化。 文献[6-7]考虑恢复初期部分负荷具有的冷负荷启 动特性,建立负荷恢复需求模型,并没有考虑到停电 时长对负荷损失的影响。文献[8]建立多时段恢复 模型,以最大化负荷加权持续供电时间为目标,提升

#### 收稿日期:2020-10-10;修回日期:2021-02-25

基金项目:江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放 基金资助项目(XTCX202001);江苏省研究生科研与实践创 新计划项目(SJCX20\_0344)

Project supported by the Open Research Fund of Jiangsu Collaborative Innovation Center for Smart Distribution Network and Equipment (XTCX202001) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (SJCX20\_0344) 了关键基础设施在恢复期的总体功能,但没有充分 考虑不同类型基础设施本身的特点及基础设施之间 的耦合关系。文献[9]针对具有耦合关系的关键基 础设施的能量需求建立数学模型,以最大化关键基 础设施运行能力为目标,建立恢复优化决策问题的 混合整数二阶锥规划模型。显然,负荷启动特性和 负荷间的职能耦合特性会影响到恢复方案,然而目 前在待恢复对象的重要度评估中均未得到体现。

不具备自启动能力的分布式电源DG(Distributed Generator)获得一定启动功率后可以形成供电孤岛为配电网提供部分恢复容量<sup>[10-11]</sup>。配电网中占比逐渐增加的风电、光伏等间歇性电源,其出力的不可控限制了供电能力的发挥。文献[12-14]考虑间歇性电源输出功率的不确定性,建立了配电网多时段负荷动态恢复模型。此外,配电网各节点间并非孤立,某一节点的供电恢复会影响到与之相连的其他节点对象的恢复进程。需要建立统一的、计及负荷与电源特性的待恢复对象重要度评价指标,从而引导多个待启动电源间以及待启动电源和待恢复负荷间的恢复次序,然而目前涉及该方面的研究较少。

针对上述问题,本文通过分析冷负荷启动特性 和负荷间职能耦合特性,对负荷的单位恢复价值进 行修正以反映负荷单位恢复价值的动态变化。计及 间歇性电源出力的可控性,基于功率预测建立电源 的可控因子,并研究计及电源出力间歇性修正的电 源恢复价值动态评估方法。考虑母线恢复可以为周 边设备供电恢复带来的潜在恢复价值与系统供电缺 额,并计及恢复的代价和恢复操作的不确定性,提出 了综合恢复收益、代价和风险的母线恢复价值动态 评估方法。进一步地,提出了基于恢复价值动态评 估的配电网供电恢复决策方法,通过仿真验证了所 提方法的有效性。

#### 1 恢复过程中的负荷需求特性

本节从冷负荷启动特性及负荷职能耦合性两方面分析恢复过程中的负荷需求特性。

#### 1.1 冷负荷启动特性

冷负荷启动是指电力设备停电后的重启过程中 出现负荷增长的情况<sup>[15]</sup>。产生原因包括:①变压器 通电瞬间的磁化电流,这个过程持续时间一般不会 超过1s;②电动机启动瞬间的冲击电流,这个过程 持续时间一般小于10s;③供电恢复过程中可能出 现的负荷多样性的丢失,其影响一般长达几分钟甚 至几个小时。前2种原因涉及恢复过程的暂态校 验,本文主要考虑造成较长时间影响的负荷同时性 问题。从负荷启动特性而言,系统中负荷主要分为 温控负荷、固定负荷以及人控负荷<sup>[9]</sup>。温控负荷重 新投入时,负荷需求量通常与故障前该类负荷量不 同;固定负荷故障前后需求量不变;人控负荷在故障 恢复时暂不接入系统。因此,温控负荷对负荷的同 时性有较大影响。

历经停电的供电恢复过程中,温控负荷(如冰 柜、冰箱、空调等)的热容量、停电时间和环境温度等 将会影响该温控负荷的启停状态和电量需求。这会 使得在配电网恢复过程中丢失负荷多样性,导致总 负荷需求增大,在局部地区和时段甚至会达到故障 前的4~5倍。随着停电时间的增加,恢复时处于启 动状态的温控负荷增多,这种特点会愈发明显。恢 复时刻温控负荷处于启动状态的概率取决于温控负 荷的热动态特性,则定义第*i*个负荷处于启动状态的 概率 β<sub>i</sub>(*t*)如下:

 $\beta_i(t) =$ 

其中,t<sub>0</sub>为初始停电时刻;t为评估时刻;温控负荷正 常运行时的启停受工作温度控制,本文以温控负荷 开始工作时的工作温度为启动温度,以停止工作时 的工作温度为停止温度,启动温度与停止温度的差 值为2倍的回差,则d<sub>a</sub>为温控负荷工作使其工作温 度从启动温度达到停止温度的时间,d<sub>a</sub>为温控负荷 停止工作使其工作温度从负荷停止温度恢复到启动 温度的时间,一般d<sub>a</sub>>d<sub>a</sub>。

#### 1.2 负荷职能耦合性

由于社会分工复杂,部分负荷关键功能的发挥 需要空间多点负荷供电的配合,因此在配电网恢复 过程中需要考虑不同负荷供电效益之间的相互关联 性。将负荷职能描述为一个多输入-多输出转换环 节,负荷职能正常发挥的必要条件是各输入能源量 及其在总输入能源中的占比均不低于相应的阈值。 负荷职能关联模型如图1所示。将负荷L<sub>a</sub>和L<sub>i</sub>职能 间的耦合关系表示为式(2)和式(3),则定义负荷L<sub>a</sub> 正常供电对负荷L<sub>i</sub>供电后职能正常发挥的影响因子 为职能关联因子ω<sub>n-i</sub>,如式(4)所示。



图 1 负荷职能关联模型 Fig.1 Load function correlation model

$$y_n = f_n(x_n) \tag{2}$$

$$y_i = f_i(x_i, y_n) = f_i(x_i, f_n(x_n))$$
 (3)

$$\omega_{n-i} = \frac{x_n}{x_n + x_i} \tag{4}$$

其中, $x_n$ 为电力系统对负荷L<sub>n</sub>的供电职能; $y_n$ 为负荷L<sub>n</sub>对负荷L<sub>i</sub>实施的职能,其是由电力系统对其实施 供电职能 $x_n$ 的作用下实现的; $x_i$ 为电力系统对负荷L<sub>i</sub> 实施的职能; $y_i$ 为负荷L<sub>i</sub>在电力系统和负荷L<sub>n</sub>对其实 施的职能 $x_i$ 和 $y_n$ 下可实现的自身职能。

#### 2 间歇性电源供电能力

在供电恢复过程中,尤其是当输电网送电阻塞时,具有一定调压调频能力的稳定配电网电源可以 通过微电网提前为周围负荷供电。以风电、光伏为 代表的间歇性电源在配电网的接入占比逐渐增加, 若能采取一定措施有效应对其间歇性和波动性,可 以充分利用其容量支撑供电恢复。

#### 2.1 间歇性电源出力预测

本文将间歇性电源出力的不确定变量表示为具 有规律性的确定预测值和具有随机性的预测误差的 结合。其中预测误差分布随预测时长的不同呈现不 同的规律,通常间歇性电源出力的短期预测误差呈 正态分布<sup>[16]</sup>,故预测误差概率密度函数可表示如下:

$$f(\Delta P_{t}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{t}}} e^{-(\Delta P_{t} - \mu_{t})^{2}/(2\sigma_{t}^{2})}$$
(5)

其中, $\Delta P_i$ 为t时刻功率预测误差; $\mu_i$ 和 $\sigma_i$ 分别为t时 刻预测误差的均值和标准差,可以由风速、光照强度 和出力采样值拟合得到。因此,间歇性电源出力预 测值 $P'_i$ 可以修正如下:

$$P_t' = P_t + \Delta P_t \tag{6}$$

其中,P,为t时刻间歇性电源出力预测值。

#### 2.2 电源供电不确定性评估

为了避免负荷频繁启停可能引起的用电设备寿 命缩短和供电安全等问题,本文在利用间歇性电源 恢复负荷时,仅当电源可以在一定评估时长内持续 为负荷供电时,才考虑用该电源恢复负荷。因此,间 歇性电源恢复能力取决于电源出力大小、持续时间 及其与供电微电网内负荷需求的匹配情况,故而电 源的恢复能力是随恢复进程和环境条件动态变化 的。即同等出力下的间歇性电源,若其可供电范围 内的所有负荷均为长时间需求,则该电源的间歇性 将使其为负荷供电的大小受到限制;若负荷的常规 送电电源将在短时间内恢复,则适当的时间和环境 下间歇性电源可以为更多的负荷提供短时的供电 支撑。

设评估时长为 $t_1$ ,则定义t时刻第g个电源输出 功率预测值的可控因子 $\delta_g(t)$ 为:

$$\delta_g(t) = \frac{1}{1+\eta} \tag{7}$$

其中,η为区间[t,t+t<sub>1</sub>]内电源输出功率预测值的标 准差。确定评估时刻t和评估时长t<sub>1</sub>的情况下,电源 出力波动性越大,其可控性越小,则可控因子越小, 稳定出力电源的可控因子为1。部分间歇性电源的 出力波动变化并不均衡,可控因子的大小取决于t和 t<sub>1</sub>的选取,因此可以用可控因子反映电源在一定观 察尺度下的动态供电能力。

#### 3 母线恢复价值动态评估

故障消失或隔离后,需要评估负荷母线和机组 母线恢复供电的重要度以指导系统供电恢复优化决 策时供电路径的优选或备用功率的分配。母线通常 接有多个负荷或机组,母线恢复的重要度体现在母 线提供给与其连接的多个负荷或机组的电量,以及 负荷或机组的单位恢复价值。因此下面从单一负荷 或机组的单位恢复价值评估方法角度出发,讨论母 线恢复的价值。

#### 3.1 负荷母线恢复价值的动态评估

3.1.1 单一负荷单位恢复价值动态评估

(1)常规负荷单位恢复价值。

故障恢复过程中,通常由负荷保供电级别评价 或者专家经验打分确定其静态重要度,保供电级别 评价较为粗糙,专家经验打分有较强的主观性。本 文定义第*i*个负荷停电后完全由自身失电所引起的 最大经济损失与其电量损失之比为该单一负荷最大 单位电量损失*b*<sub>i</sub>,可用其评估单一常规负荷的单位 恢复价值。

(2)负荷单位恢复价值的冷负荷启动特性修正。

由于温控负荷所服务对象一般自身具有一定的 热容量,温控负荷的停电损失会随着停电时间变化, 即温控负荷的单位恢复价值会随停电时间变化,停 电时长越大,单位恢复价值越大,并最终会趋于该负 荷最大单位电量损失 *b*<sub>i</sub>,此外,温控负荷的单位恢复 价值还会受到负荷种类、环境温度等因素的影响。因此,考虑到温控负荷的冷负荷启动特性,本文将 t 时刻第 i 个负荷的单位恢复价值 b<sub>i</sub>(t)修正为:

$$b_{i}(t) = \boldsymbol{\beta}_{i}(t) \overline{b}_{i} \left[ 1 - \boldsymbol{\gamma}_{i} \mathrm{e}^{\frac{-(t-t_{0})}{\tau}} \right]$$
(8)

其中,γ<sub>i</sub>为第*i*个负荷的负荷类型,取值为1时表示 温控负荷,取值为0时表示非温控负荷;τ为温控负 荷停电后其温度恢复至环境温度所需的时间。

(3)负荷单位恢复价值的职能关联修正。

部分负荷关键职能的充分发挥需要其他负荷供 电的配合,对这类负荷提前独立供电的意义不大。 这些具有职能耦合关系的负荷,它们恢复供电的重 要度应彼此相互影响。因此,需要在负荷单位恢复 价值中考虑负荷职能的关联因素。设有N个负荷具 有职能耦合关系,本文定义t时刻第i个负荷计及负 荷职能关联修正的单位恢复价值b<sub>i</sub>(t)如下:

$$b'_{i}(t) = b_{i}(t) + \sum_{n=1, n \neq i}^{N} \lambda_{n} \omega_{n-i} b_{n}(t) \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}$$
(9)

其中, $\lambda_n$ 为第n个负荷的恢复状态,取值为1时表示已恢复,取值为0时表示未恢复。

3.1.2 负荷母线恢复价值动态评估

Г

负荷母线的恢复价值主要取决于该负荷母线恢 复所带来的收益、恢复过程中所需要的代价和风险。 考虑到母线恢复将缩短周边母线与带电系统之间的 距离,因此具有潜在恢复收益,故而负荷母线的恢复 收益包括该母线上待恢复负荷的恢复收益和恢复该 母线可以为周边母线带来的潜在恢复收益和恢复该 母线可以为周边母线带来的潜在恢复收益。本文基 于待恢复负荷的单位恢复价值、待恢复负荷的容量、 评估时长、待恢复负荷母线与供电系统之间的电气 距离和系统供电容量的充足性定义待恢复负荷母线 的恢复收益,即t时刻第1条待恢复负荷母线的恢复 收益1<sub>i</sub>(t)可以定义为:

$$I_{l}(t) = \left[ \left( \sum_{i=1}^{M_{l-0,1}} b'_{l-0,1,i}(t) P_{l-0,1,i} \right) \max \{ T - \Delta t_{l}, 0 \} + \sum_{j=1}^{J_{l}} \sum_{k=1}^{K_{l-j}} \frac{\sum_{i=1}^{M_{l-j,k}} b'_{l-j,k,i}(t) P_{l-j,k,i}}{j + r_{l-j,k} + 1} \max \{ T - \Delta t_{l} - j\Delta t, 0 \} \right] \eta_{l-\text{adq}}(t)$$

$$\eta_{l-\mathrm{adq}}(t) = \frac{\Delta P_{\mathrm{G}l-\mathrm{max}}(t)}{P_{\mathrm{I}l-\mathrm{to}\_\mathrm{recr}}(t)} \times 100\%$$
(11)

其中,b'<sub>i-0,1,i</sub>(t)、P<sub>i-0,1,i</sub>分别为第1条待恢复负荷母线 上第i个待恢复负荷在t时刻的单位恢复价值和负荷 容量;b'<sub>l-i,k,i</sub>(t)、P<sub>l-i,k,i</sub>分别为从第1条负荷母线向外 做宽度优先遍历,得到的第i层第k条负荷母线上第 i个待恢复负荷在t时刻的单位恢复价值和负荷容 量; $i \in \{1, 2, \dots, M_{l-i,k}\}, M_{l-0,1}$ 为第l条负荷母线上所 有待恢复负荷的个数,M<sub>1-1k</sub>为从第1条负荷母线向 外做宽度优先遍历,得到的第 i 层第 k 条负荷母线上 所有待恢复负荷的个数;k为负荷母线的序号,且  $k \in \{1, 2, \dots, K_{l-i}\}, K_{l-i}$ 为从第l条负荷母线向外做宽 度优先遍历,得到的第i层上母线的总条数;i为从 第1条负荷母线向外做宽度优先遍历时的层数序号, 且 $j \in \{0, 1, \dots, J_l\}, j=0$ 时表示第l条负荷母线本身,  $J_l$ 为从第1条负荷母线向外做宽度优先遍历所设定的 总层数: $\Delta t_i$ 为初始停电时刻至第l条负荷母线预估 恢复时刻的耗时;T为计算恢复价值的评估时长; $\Delta t$ 为恢复1条负荷母线的平均耗时;r<sub>l-ik</sub>为第1条负荷 母线与第 j 层第 k 条母线之间最短路径的线路段 数; $\eta_{l-adg}(t)$ 为t时刻第l条负荷母线所属拟供电分区 的系统供电容量充足性,反映系统供电缺额情况(即 系统备用功率对负荷需求的供应能力); $\Delta P_{Gl-max}(t)$ 为t时刻第1条负荷母线所属分区内(准)带电系统的 旋转备用容量与正常恢复中机组的额定容量之和;  $P_{\text{U-to regr}}(t)$ 为t时刻第l条负荷母线所属分区内剩余 待恢复容量。其中分区为当系统中有多个(准)带电 系统时,根据一定原则将恢复对象划分给某(准)带 电系统形成各自独立的恢复分区;带电系统为处于 稳定运行状态的系统;准带电系统为处于停电状态 但有自启动能力的电源或由供电能力的母线。

第1条负荷母线的恢复代价 C<sub>1</sub>(t) 主要包括两方 面:一方面是电源与该负荷母线之间最短路径上所 有开关操作代价之和;另一方面是为了保证供电安 全性所实施的电压控制代价(无功补偿)。

$$C_{l}(t) = C_{l-e}(t) + C_{l-ctrl}(t)$$
(12)

其中,*C<sub>l-e</sub>(t)为t*时刻恢复第*l*条负荷母线的耗能代价;*C<sub>l-ettl</sub>(t)为t*时刻恢复第*l*条负荷母线所需的控制代价,包括电压控制代价、电源与待恢复第*l*条负荷母线之间最短路径上的开关动作的折损费用和操作管理费用等。

第*l*条负荷母线的恢复风险主要是指恢复过程 中的操作风险*R<sub>l</sub>*(*t*),具体如下:

$$R_l(t) = p_l(t)L_{\rm sl}(t) \tag{13}$$

其中,p<sub>1</sub>(t)为t时刻恢复第1条负荷母线不成功的概 率;L<sub>s1</sub>(t)为t时刻第1条负荷母线因恢复不成功而延 迟供电造成的损失,已恢复负荷母线的恢复风 险为0。

第l条负荷母线的恢复价值 $V_l(t)$ 为:

$$V_{l}(t) = I_{l}(t) - C_{l}(t) - R_{l}(t)$$
(14)

#### 3.2 机组母线恢复价值的动态评估

待恢复机组母线恢复价值包括:机组母线恢复 后,机组启动所能为周边负荷恢复带来的收益;恢复 过程中所需要的代价;恢复操作不确定性所带来的 风险。

机组母线的恢复收益取决于机组启动后能恢复 周边母线上待恢复负荷所产生的潜在收益,即第g 条机组母线的恢复收益*I*<sub>g</sub>(*t*)定义为:

$$I_{g}(t) = \delta_{g}(t) \sum_{w=1}^{W_{g}} \left[ \sum_{k=1}^{K_{g-w}} \sum_{i=1}^{M_{g-w,k,i}} b'_{g-w,k,i}(t) P_{g-w,k,i} \times \max\left\{ T - \Delta t_{g} - \Delta t_{sg} - w\Delta t, 0 \right\} \right] / \eta_{g-adq}(t) \quad (15)$$

$$\eta_{g-\text{adq}}(t) = \frac{\Delta P_{Gg-\text{max}}(t)}{P_{Lg-\text{to_recr}}(t)} \times 100\%$$
(16)

其中,b'<sub>g-w,k,i</sub>(t)、P<sub>g-w,k,i</sub>分别为从第g条机组母线向外 做宽度优先遍历,得到的第w层第k条母线上第i个 待恢复负荷在t时刻的单位恢复价值和负荷容量;  $i \in \{1, 2, \dots, M_{g-w,k}\}, M_{g-w,k}$ 为从第g条机组母线向外 做宽度优先遍历,得到的第w层第k条母线上所有待 恢复负荷的个数; $k \in \{1, 2, \dots, K_{x-w}\}, K_{x-w}$ 为从第g条 机组母线向外做宽度优先遍历,得到的第w层上母 线的总条数;w为从第g条机组母线向外做宽度优先 遍历时的层数序号, $w \in \{1, 2, \dots, W_g\}, W_g$ 为从第g条 机组母线向外做宽度优先遍历所设定的总层数,W 的取值取决于第g条机组母线上机组的额定容量与 周围负荷母线上的待恢复容量;Δt<sub>g</sub>为初始停电时刻 至第g条机组母线的预估恢复时刻的耗时; $\Delta t_{ss}$ 为第 g条机组母线上机组的启动耗时; $\eta_{g-adg}(t)$ 为t时刻第 g条机组母线所属拟供电分区的系统供电容量充足 性; $\Delta P_{G_{g-max}}(t)$ 为t时刻第g条机组母线所属分区内 (准)带电系统的旋转备用容量与正常恢复中机组的 额定容量之和; $P_{L_{g-to recr}}(t)$ 为t时刻第g条机组母线 所属分区内剩余待恢复容量。

第g条机组母线的恢复代价与恢复风险的计算 方法同负荷母线,不再赘述,则第g条负荷母线的恢 复价值V<sub>g</sub>(t)为:

$$V_{g}(t) = I_{g}(t) - C_{g}(t) - R_{g}(t)$$
(17)

其中, $C_{g}(t)$ 、 $R_{g}(t)$ 分别为t时刻第g条机组母线的恢复代价和恢复风险。

综上,分区内母线恢复价值动态评估的流程见 附录A图A1。

# 4 基于母线恢复价值动态评估的配电网供电恢复优化模型

配电网供电恢复可以视作为由一系列恢复进程 组成,每个恢复进程完成一定待恢复对象(本文将具 有恢复供电可能性的负荷或机组统称为待恢复对 象)的供电操作。待恢复对象因提前恢复供电会带 来一定的收益,该收益取决于待恢复对象的重要级 别、需求容量和提前恢复供电时间。同时在恢复过 程中会伴随因能源消耗、开关操作等而产生的控制 代价,另外,设备操作具有不确定性,停电后恢复操 作的不确定性更大,不能忽视。因此,恢复控制决策 是一个多进程多目标的优化问题。将恢复收益、恢 复代价与恢复风险统一为货币量纲,并定义它们的 代数和为恢复净收益<sup>[17-18]</sup>。

#### 4.1 目标函数

本文以全部恢复进程的整体恢复净收益最大化 为目标建立配电网恢复决策优化模型如下:

$$\max F(t) = \sum_{m=1}^{M} \left( F_{1}^{m}(t) - F_{C}^{m}(t) - F_{R}^{m}(t) \right) \quad (18)$$

其中,F(t)为t时刻在恢复方案执行的全部恢复进程 中可获得的累积恢复净收益;M为恢复进程总数;m为恢复进程的序号; $F_1^m(t) \ F_c^m(t) \ F_R^m(t)$ 分别为t时刻 第m个恢复进程的恢复收益、恢复代价和恢复风险, 可由式(19)—(21)计算得到。

$$F_{1}^{m}(t) = \sum_{x=1}^{N_{m,1}} b_{m,x}(t) P_{m,x} T_{m,x}$$
(19)

$$F_{\rm C}^{m}(t) = C_{m,e}(t) + C_{m,\,\rm ctrl}(t)$$
(20)

$$F_{\rm R}^{m}(t) = \sum_{z=1}^{m,v} p_{m,z}(t) L_{{\rm S}m,z}(t)$$
(21)

其中, $N_{m,1}$ , $N_{m,d}$ 分别为第m个进程中待恢复对象的总数和恢复路径的总数; $b_{m,x}(t)$ 为t时刻第m个进程中第x个待恢复对象单位时间内单位恢复价值; $P_{m,x}$ 为第m个进程中第x个待恢复对象需要的供电容量;  $T_{m,x}$ 为第m个进程中第x个待恢复对象提前供电的时间; $C_{m,e}(t)$ 为t时刻第m个进程中待恢复对象的耗能代价; $C_{m,etd}(t)$ 为t时刻第m个进程中恢复待恢复对象的控制代价;z为第m个进程中恢复路径的序号; $p_{m,z}(t)$ 为t时刻第m个进程中第z条路径投运不成功造成的损失。

4.2 约束条件

(1)恢复进程的潮流平衡约束。

$$\begin{vmatrix} P_i + P_{\mathrm{DG}i} - P_{\mathrm{d}i} = U_i \sum_{j=1}^{N} U_j \left( G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \\ Q_i + Q_{\mathrm{DG}i} - Q_{\mathrm{d}i} = U_i \sum_{j=1}^{N} U_j \left( G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \right) \end{vmatrix}$$
(22)

其中, $P_i$ 、 $Q_i$ 分别为节点*i*注入的有功功率和无功功 率; $P_{DGi}$ 、 $Q_{DGi}$ 分别为接入节点*i*的分布式电源的有功 功率和无功功率; $P_{di}$ 、 $Q_{di}$ 分别为节点*i*处母线所需的 有功功率和无功功率; $U_i$ 、 $U_j$ 分别为节点*i*、*j*的电压 值; $G_u$ 、 $B_u$ 分别为线路*i*-*j*导纳的实部和虚部; $\theta_i$ 为节 点*i*与节点*j*的相角差;*N*为带电系统节点总数。 (2)节点电压约束。

$$U_{i,\min} \le U_i \le U_{i,\max} \tag{23}$$

其中, U<sub>i,max</sub>、U<sub>i,min</sub>分别为节点 i 电压允许的上限和下限值。

(3)支路电流约束。

$$I_{i-j,\min} \leq I_{i-j} \leq I_{i-j,\max}$$
(24)

其中, $I_{i-j}$ 为支路i-j的电流值; $I_{i-j,\min}$ 、 $I_{i-j,\max}$ 分别为支路i-j允许电流的下限和上限值。

(4)支路容量约束。

$$S_{i-i} \leq S_{i-i,\max} \tag{25}$$

其中, $S_{i-j}$ 、 $S_{i-j,\max}$ 为支路i-j的实际容量和最大容量。 (5)拓扑结构约束。

其中,g<sub>1</sub>为网络拓扑结构;G为所有辐射状网络拓扑 集合。

 $g_1 \in G$ 

4.3 基于恢复价值动态评估的配电网恢复方案的 求解步骤

基于恢复价值动态评估的配电网恢复方案求解 步骤如下。

步骤1:基于图论建立配电网网络拓扑结构,并 识别配电网中(准)带电系统和待恢复母线。

步骤2:根据(准)带电系统划分分区,当待恢复 母线与一个以上的(准)带电系统存在连通路径时, 兼顾送电路径、备用容量、停电前的原始送电方式等 因素确定待恢复母线应被划分的恢复分区。

步骤3:分区内独立优化,判断分区内是否含间 歇性电源,若含则转至步骤4,否则转至步骤5。

步骤4:采用第2节所提方法对间歇性电源供电 能力进行评估。

步骤5:采用第3节所提方法对分区内母线进行 恢复价值动态评估。

步骤6:确定当前分区内恢复价值最高前n条 母线,并设置单进程恢复容量为na(本文取n=3、a= 3 MW),以当前时刻单位恢复价值最高的负荷为当 前恢复进程的恢复方案。

步骤7:更新分区内已恢复供电的负荷及相应 的供电电源,重复步骤3-6,进入下一恢复进程,直 至分区内无法生成新的恢复方案,即分区内恢复操 作结束。

步骤8:重复步骤3一7,直至所有分区无法生成 新的恢复方案,从而得到配电网最终的供电恢复 方案。

#### 5 算例验证

为了验证本文所提方法的有效性,基于C++语 言开发了基于恢复价值动态评估的配电网恢复控制 决策系统,并进行了相关仿真计算,所有的仿真均是 在1台配置为Intel Core i5-3337 CPU@1.80 GHz、 8 GB RAM的计算机上完成的。本文以某配电网供 电恢复过程中多个并行分区中的1个为例说明恢复 价值动态评估对供电恢复决策的影响,配电网分区 具体结果的示意图见附录B图B1,该分区拓扑如图 2所示,各母线负荷信息见附录C表C1,负荷总量为 275 MW,设所有负荷均为可控负荷。本文将负荷最 大单位电量损失分为1—5级,分别对应为100、40、 30、20、10万元/(MW·h)。图2中的负荷均表示母 线所带负荷的聚合,下文中用"母线序号-该母线带 负荷序号"表示未聚合的负荷名称,以B<sub>1-1</sub>为例,其 表示母线B<sub>1</sub>上的1号负荷。分区内有2个分布式电 源DG<sub>1</sub>与DG<sub>2</sub>,均不能自启动,机组母线以机组名称 命名。恢复价值的评估时长*T*=12 h。



图2 某地级配电网局部系统拓扑

Fig.2 Local system topology of grading distribution network in a certain place

#### 5.1 计及负荷恢复价值修正的恢复决策

区域全停时刻记为 00:00,设 DG<sub>1</sub>为燃气轮机 (额定功率为 50 MW,启动功率为 0.5 MW,启动耗时 5 min)且处于停机状态,DG<sub>2</sub>为光伏机组且发生永久 故障。02:00时刻,输电网由母线 AP<sub>1</sub>送电 100 MW, 03:30时刻,输电网送电容量恢复至停电前的水平。 负荷 B<sub>3-4</sub>、B<sub>3-8</sub>、B<sub>5-4</sub>、B<sub>8-4</sub>、B<sub>12-1</sub>为温控负荷。计及冷负 荷启动特性修正后,它们的单位恢复价值随停电时 间的变化如图 3 所示。由图 3 可见,停电初期各温控 负荷的单位恢复价值不大,但随着停电时间的延长, 单位电量损失。具有职能耦合关系的负荷见附录 D 表 D1。以负荷 B<sub>2-3</sub>、B<sub>5-1</sub>和 B<sub>3-2</sub>为例,负荷 B<sub>2-3</sub>、B<sub>5-1</sub>对 负荷 B<sub>3-2</sub>职能发挥的影响因子分别为 0.2 和 0.1,负荷 B<sub>2-3</sub>对负荷 B<sub>5-1</sub>职能发挥的影响因子为 0.3。本文定 义负荷运行能力达到最大运行能力的倍数为负荷的 职能完成度。根据算例系统中负荷间的职能耦合关 系,将负荷间的职能完成度设置如下:仅负荷 B<sub>3-2</sub>恢 复供电,其职能完成度为0.7;负荷 B<sub>3-2</sub>与 B<sub>5-1</sub>均恢复 供电,负荷 B<sub>3-2</sub>的职能完成度为0.8,负荷 B<sub>5-1</sub>的职能 完成度为0.7;负荷 B<sub>2-3</sub>、B<sub>5-1</sub>和 B<sub>3-2</sub>均恢复供电,三者 的职能完成度均为1。



图 3 计及冷负荷启动特性修正的温控负荷单位恢复价值

Fig.3 Unit restoration value of thermostatically controlled load considering correction of cold load start-up characteristic

02:00时刻输电网送电,按照第3节所提方法对 该分区内各母线进行恢复价值评估,评估结果如表1 所示。由表1可知,02:00时刻恢复价值最大的3个 母线分别为DG<sub>1</sub>、B<sub>3</sub>和B<sub>4</sub>,因为分区内恢复容量不 足,所以计算得到的DG,恢复价值最大,母线B,和B, 所连负荷中因重要负荷占比较大,因此也有很大的 恢复价值。采用本文所提恢复决策优化方法,得到 进程1的恢复对象为DG1、负荷B3、和负荷B41。进程1 执行后刷新母线的恢复价值,优化得到下一个恢复 进程的恢复对象,直至该分区恢复供电,整体恢复方 案见附录D表D2。整个恢复过程中,部分母线恢复 价值动态变化如图4所示,剩余母线恢复价值动态 变化见附录E图E1。由图可知,恢复进程1(02:00 时刻)中DG,启动并恢复供电,恢复进程19(03:30时 刻)中输电网向配电网增发容量,均使分区供电容量 增加,因此,在接下来的进程中所有负荷母线恢复价 值均大幅度增加;其余时段,随着恢复进程的推进, 分区内备用容量不断减少,因此分区内各负荷母线 恢复价值均逐渐减小。

表1 各母线02:00时刻恢复价值

Table 1 Restoration value of each bus at 02:00

母线	恢复价值 / 万元	母线	恢复价值 / 万元
$DG_1$	27 350	B <sub>7</sub>	7719
$B_1$	7044	B <sub>8</sub>	7215
$B_2$	6911	B <sub>9</sub>	7719
$B_3$	9171	B <sub>10</sub>	7 304
$B_4$	8731	B <sub>11</sub>	7 597
$B_5$	7 3 2 6	B <sub>12</sub>	7 0 8 5
$B_6$	7008		

采用多种母线恢复价值评估方法进行恢复决策



Fig.4 Dynamic variation tendency of restoration value for buses

来验证本文所提方法的合理性,分别记为:方法1是 本文所提母线恢复价值评估方法:方法2是仅忽略方 法1中冷负荷启动特性;方法3是仅忽略方法1中负 荷职能耦合影响;方法4是仅采用负荷自身重要度 静态评估母线恢复价值,即忽略冷负荷启动特性、负 荷职能耦合关系和母线周边潜在恢复价值的影响。

分别采用方法1与方法3进行恢复决策时,负荷 B<sub>2-3</sub>、B<sub>5-1</sub>和B<sub>3-2</sub>职能完成度随时间变化的趋势如附录 E图E2所示,其中方法1、3所得的结果分别用实线 和虚线表示。由图E2可知,采用方法1时,负荷B<sub>3-2</sub>、 B<sub>5-1</sub>和B<sub>2-3</sub>恢复时刻分别为02:00、02:05和02:10,即 02:10时刻3个负荷的职能完成度均达到1;采用方 法3时,负荷B<sub>3-2</sub>、B<sub>5-1</sub>和B<sub>2-3</sub>恢复时刻分别为02:00、 02:10和02:30,即02:30时刻3个负荷的职能完成度 均达到1。由此可见充分考虑计及负荷间职能耦合 影响进行恢复决策,能够使相关负荷尽量同步快速 恢复,从而使重要负荷尽快恢复完善其职能。

分别基于以上4种母线恢复价值评估方法进行 恢复决策所获得的实际净收益曲线如图5所示。由 图5可知,采用方法1所得净收益最大;由于该区域 02:00时刻才有容量启动供电恢复,大部分温控负荷 在历经2h的停电后,其单位恢复价值与其最大单位 电量损失已经很接近,因此,采用方法2所得净收益 只略小于方法1所得净收益,并大于方法3所得净收 益;方法4所得净收益明显小于其他3种方法所得净 收益。算例分析充分说明,在母线恢复价值评估中充 分考虑冷负荷启动特性、负荷职能耦合关系和母线周 边潜在恢复价值的影响,对于提升恢复的净收益、使 恢复容量获得更大的经济效益具有显著的帮助。





#### 5.2 计及电源间歇性的恢复决策

区域全停时刻记为 00:00,设 DG<sub>1</sub> 为风电机组 (额定功率为 60 MW,启动功率为 0.5 MW,启动耗时 5 min)和 DG<sub>2</sub>为光伏机组(额定功率为 40 MW,启动 功率为 0.2 MW,启动耗时 2 min),且 DG<sub>1</sub>和 DG<sub>2</sub>均处 于停机状态。区域内负荷均需要不间断供电,负荷 组成及特性同 5.1 节。01:00时刻输电网由母线 AP<sub>1</sub> 送电 100 MW,02:00时刻输电网送电容量恢复至停 电前的水平。

采用上述2.1节所提方法分别对DG,和DG,在 01:00-02:00时段的出力进行预测,预测时间间隔 为5min,预测结果如附录E图E3实线所示,虚线表 示电源的可控因子。由图可知, DG1出力预测值的 波动性比DG,出力预测值的波动性大,因此,其可控 因子小于DG,的可控因子。01:00-02:00时段部分 母线恢复价值动态变化如图6所示(剩余母线恢复 价值动态变化见附录E图E4)。由图E3与图6可 知:在恢复初期因间歇性电源DG,与DG,出力具有波 动性,且系统供电容量较为充足,因此,DG,和DG,的 恢复价值远小于负荷母线恢复价值;随着恢复进程 的推进,系统供电容量减少,电源的恢复价值增大, 由于DG,的出力预测值较DG,稳定,其恢复价值一直 大于DG<sub>1</sub>,至01:20时刻(恢复进程8),其恢复价值大 于负荷母线,因此决策恢复DG;;DG,的出力预测值 在01:30时刻后更为稳定,此时也较接近输电网送电 增大时刻(02:00时刻),因此DG,有可能提前为负荷 供电直至输电网有充足容量馈入,不会造成负荷的 二次停电,因此01:30时刻(恢复进程12),DG,的恢 复价值超越负荷母线,此时恢复DG1。后续恢复过 程与5.1节类似,不再赘述。由此可见,本文所提的 母线恢复价值动态评估方法对于恢复过程中提高间 歇性电源利用率、提升恢复的经济效益和加快恢复 进程具有显著效果。





Fig.6 Dynamic variation tendency of restoration value for buses considering power intermittency

#### 6 结论

本文充分考虑了冷负荷启动特性和负荷职能耦 合关系对负荷单位恢复价值进行修正,计及间歇性 电源出力的可控性建立基于功率预测的电源可控因 子,基于此,结合母线恢复的潜在恢复价值和系统供 电缺额,建立了综合恢复收益、代价和风险的电源或 负荷母线恢复价值动态评估方法。并进一步提出了 基于恢复价值动态评估的配电网供电恢复优化决策 方法,通过算例验证说明本文所提方法能够充分反 映待恢复对象恢复价值随停电时长与恢复进程的动 态变化,对有效提高恢复资源的利用率、提升恢复效 率以获得更大的经济收益具有显著帮助。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] ALLEN E H, STUART R B, WIEDMAN T E. No light in August: power system restoration following the 2003 North American blackout[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2014, 12(1): 24-33.
- [2] 薛禹胜,肖世杰.综合防御高风险的小概率事件:对日本相继 天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J].电力系统自动化, 2011,35(8):1-11.
   XUE Yusheng,XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(8):1-11.
- [3] 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.
   TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31,2012
   [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):167-174.
- [4]杨丽君,张广超,吕雪姣,等.考虑可控负荷的含分布式电源配 电网短时故障供电恢复[J].电力自动化设备,2016,36(11): 11-17,26.

YANG Lijun,ZHANG Guangchao,LÜ Xuejiao,et al. Power restoration considering controllable load for short-time fault of distribution network with DGs[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):11-17,26.

[5] 刘文轩,顾雪平,李少岩.考虑机组重要度和负荷停电损失的 网架重构分层协调优化[J].华北电力大学学报(自然科学版),2017,44(2):22-32.

LIU Wenxuan, GU Xueping, LI Shaoyan. Hierarchical coordinative optimization for network reconfiguration considering unit importance and the load outage loss[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44 (2):22-32.

- [6] 姚梦,王越.考虑冷负荷冲击影响的电动汽车辅助孤岛复电方法[J].电力系统自动化,2019,43(7):144-152.
   YAO Meng,WANG Yue. Restoration method of electric power supply for isolated island with auxiliary of electric vehicles considering impact of cooling load[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(7):144-152.
- [7]赵宝斌,顾雪平,岳贤龙,等. 计及冷负荷恢复特性的单节点最 大负荷恢复量计算[J]. 现代电力,2016,33(3):68-75.
  ZHAO Baobin,GU Xueping,YUE Xianlong,et al. Analysis on maximum restorable load at single node by considering pickup characteristic of cold load[J]. Modern Electric Power,2016,33 (3):68-75.
- [8] SHARKEY T C, CAVDAROGLU B, NGUYEN H, et al. Interdependent network restoration: on the value of information-sharing
   [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 244(1): 309-321.
- [9]高天乐,李佳旭,王颖,等. 计及负荷侧关键基础设施耦合性的 配电网恢复优化决策方法[J]. 电力建设,2019,40(12):38-44.

GAO Tianle, LI Jiaxu, WANG Ying, et al. Optimization decision-making method for distribution network restoration considering the interdependency of critical infrastructure on load side[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(12):38-44.

- [10] 李红伟,林山峰,吴华兵,等. 基于动态规划算法的配电网孤岛 划分策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):47-52.
  LI Hongwei,LIN Shanfeng,WU Huabing, et al. Islanding strategy based on dynamic programming algorithm for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):47-52.
- [11] GAO Haixiang, CHEN Ying, XU Yin, et al. Resilience-oriented critical load restoration using microgrids in distribution systems
   [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6):2837-2848.
- [12] GOLSHANI A, SUN Wei, SUN Kai. Real-time optimized load recovery considering frequency constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6):4204-4215.
- [13] 许寅,王颖,和敬涵,等. 多源协同的配电网多时段负恢复优化 决策方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):123-133.
   XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal decisionmaking method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(2):123-133.
- [14] 刘路宁,彭春华,温泽之,等. 基于配电网动态重构的分布式光 伏消纳策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):56-62.
   LIU Luning, PENG Chunhua, WEN Zezhi, et al. Distributed photovoltaic consumption strategy based on dynamic reconfiguration of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):56-62.
- [15] SCHNEIDER K P,SORTOMME E,VENKATA S S,et al. Evaluating the magnitude and duration of cold load pick-up on residential distribution feeders using multi-state load models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3765-3774.
- [16] 姜欣,陈红坤,熊虎,等.基于预测误差不确定性的规模化间歇 式电源机组组合研究[J].电网技术,2014,38(9):2455-2460. JIANG Xin, CHEN Hongkun, XIONG Hu, et al. A prediction error uncertainty based day-ahead unit commitment of largescale intermittent power generation[J]. Power System Technology,2014,38(9):2455-2460.
- [17] 周天,郝丽丽,王昊昊,等. 兼顾风险与收益的主动配电网非正常停运恢复策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):136-144. ZHOU Tian,HAO Lili,WANG Haohao,et al. Unscheduled outage restoration strategy of active distribution network considering risk and gain[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(13):136-144.
- [18] 王辉,郝丽丽,黄梅,等.基于历史故障信息的配电网设备故障概率建模[J].电力自动化设备,2020,40(3):76-84.
   WANG Hui,HAO Lili,HUANG Mei,et al. Failure probability model of distribution network equipment based on historical fault information [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(3):76-84.

#### 作者简介:



郝丽丽

郝丽丽(1979—),女,河北昌黎人,副
教授,博士,主要研究方向为电力系统安全
稳定分析与控制(E-mail:lili\_hao@163.com);
陈从霜(1995—),女,江苏淮安人,硕
士研究生,通信作者,主要研究方向为智能
配电网(E-mail:1679893183@qq.com);
王 川(1996—),男,江苏扬州人,硕

士研究生,主要研究方向为智能配电网 (E-mail:1275552944@qq.com)。

(编辑 李玮)

### Novel method for single-phase grounding fault line selection in distribution network based on S-transform correlation and deep learning

YIN Haoran<sup>1,2</sup>, MIAO Shihong<sup>1,2</sup>, GUO Shuyu<sup>1,2</sup>, HAN Ji<sup>1,2</sup>, WANG Zixin<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and

Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The fault characteristics of single-phase grounding faults in small current grounding systems are not obvious, and the existing line selection methods are susceptible to fault conditions and environmental noise. A novel line selection method based on S-transform correlation and deep learning is proposed, which has strong anti-noise ability and high generalization level. Firstly, the time-frequency information of the zerosequence current is obtained by S-transform, which is used to calculate the fault characteristic information correlation between each line. Then, a construction method of SCF(S-transform Correlation Figure) is proposed to improve the identifiability and anti-interference of the fault characteristics, based on which, the S-CNN (Convolutional Neural Network deep learning model with SCF construction layer) is constructed, and its structural parameters and hyperparameters are trained step by step with the fault data generated by the Simulink simulation model. Finally, S-CNN is used to extract the deep features of the fault zero-sequence current to select the fault line, and the effect of S-CNN under different operating conditions and fault conditions are tested. Simulative results and actual distribution network data test show that the fault line selection model based on S-CNN can achieve high accuracy under different fault locations, fault phase angles, transition resistances, load fluctuations or strong noise interference conditions, and still has strong robustness under the condition of unsynchronized zero-sequence current sampling of each line.

Key words: distribution network; fault line selection; deep learning; S-transform; CNN

(上接第80页 continued from page 80)

## Restoration control strategy of distribution network based on dynamic evaluation of restoration value

HAO Lili<sup>1</sup>, CHEN Congshuang<sup>1</sup>, WANG Chuan<sup>1</sup>, CAI Jilin<sup>1</sup>, HAO Sipeng<sup>2</sup>, LIU Haitao<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** The power outage scenario, restoration process and load functions under emergency situations may affect the power supply restoration urgency of load during distribution network restoration. Usually, the importance level or degree of the object to be restored is statically set according to its own restoration value, which restricts the refined management of limited restoration resources. Considering the impact of cold load pick-up characteristic and functional coupling relationship among loads on load unit restoration value, considering the impact of controllability of intermittent power output on generation restoration value, combining with the potential restoration value provided by bus restoration to other surrounding objects to be restored, together with the sufficiency of system, the cost of restoration and the uncertainty of restoration operations, a dynamic evaluation approach for load and generator importance degree is proposed with comprehensive restoration benefits, costs and risks. Based on this, a multi-process optimization model for power supply restoration of the distribution network and a partition parallel restoration decision-making method are developed. Finally, simulative results verify that the proposed strategy can effectively improve the utilization of resources.

Key words: distribution network; restoration value; uncertainty; dynamic evaluation; restoration control strategy

附录 附录 A



图 A1 母线恢复价值动态评估 Fig.A1 Dynamic evaluation of bus restoration value



图 B1 分区结果示意图 Fig.B1 Schematic diagram of partition results

附录 B

#### 附录 C

#### 负荷容 负荷容 负荷名称 负荷等级 所属母线 负荷名称 负荷等级 所属母线 量/MW 量/MW $B_{1-1}$ 2 2 4 5 $B_6$ $\mathbf{B}_1$ B<sub>6-8</sub> 2 2 2 **B**<sub>7</sub> B<sub>1-2</sub> 2 $B_1$ B<sub>7-1</sub> B<sub>1-3</sub> 2 2 $B_1$ B<sub>7-2</sub> 3 3 **B**<sub>7</sub> 2 B<sub>7-3</sub> 3 **B**<sub>7</sub> B<sub>1-4</sub> 3 $B_1$ 4 2 3 B<sub>1-5</sub> 3 $B_1$ B<sub>7-4</sub> 2 **B**<sub>7</sub> 2 B<sub>1-6</sub> 3 $B_1$ B<sub>7-5</sub> 2 4 **B**<sub>7</sub> B<sub>1-7</sub> 3 4 $B_1$ B<sub>7-6</sub> 4 4 **B**<sub>7</sub> B<sub>1-8</sub> 2 2 4 **B**<sub>7</sub> 4 $B_1$ B<sub>7-7</sub> B<sub>1-9</sub> 3 5 **B**<sub>7</sub> 5 $\mathbf{B}_1$ B<sub>7-8</sub> 3 B<sub>1-10</sub> 2 5 $B_1$ B<sub>8-1</sub> 3 2 $B_8$ 3 2 2 3 $B_8$ B<sub>2-1</sub> $B_2$ B<sub>8-2</sub> 2 B<sub>2-2</sub> 3 2 $B_2$ $B_8$ B<sub>8-3</sub> 4 6 3 $B_8$ B<sub>2-3</sub> 3 $B_2$ B<sub>8-4</sub> 3 B<sub>2-4</sub> 5 4 $B_2$ B<sub>8-5</sub> 2 4 $B_8$ B<sub>2-5</sub> 2 5 $B_2$ B<sub>8-6</sub> 5 4 $B_8$ 3 2 4 B<sub>2-6</sub> 5 $B_2$ B<sub>8-7</sub> $B_8$ 2 B<sub>3-1</sub> 1 $B_3$ B<sub>8-8</sub> 2 5 $B_8$ B<sub>3-2</sub> 3 **B**<sub>3</sub> B<sub>9-1</sub> 2 1 B9 1 B<sub>3-3</sub> 3 2 $B_3$ 3 2 B9 B<sub>9-2</sub> B<sub>3-4</sub> 3 2 $B_3$ B<sub>9-3</sub> 2 3 B<sub>9</sub> B<sub>3-5</sub> 4 3 **B**<sub>3</sub> B<sub>9-4</sub> 5 3 B9 3 **B**<sub>3</sub> 2 4 B9 B<sub>3-6</sub> 4 B<sub>9-5</sub> 2 4 B<sub>3-7</sub> B9 4 $B_3$ B<sub>9-6</sub> 4 B<sub>3-8</sub> 4 4 $B_3$ B<sub>9-7</sub> 2 4 B9 B<sub>3-9</sub> 3 5 **B**<sub>3</sub> B<sub>9-8</sub> 3 5 B9 3 2 2 $B_{10}$ B<sub>4-1</sub> $B_4$ B<sub>10-1</sub> 1 2 3 B<sub>4-2</sub> $B_4$ 5 $\mathbf{B}_{10}$ 1 B<sub>10-2</sub> B<sub>4-3</sub> 3 2 $B_4$ B<sub>10-3</sub> 2 3 $B_{10}$ B<sub>4-4</sub> 5 3 $B_4$ B<sub>10-4</sub> 2 3 $B_{10}$ 4 B<sub>10-5</sub> 4 B<sub>4-5</sub> 4 $B_4$ 4 $\mathbf{B}_{10}$ B<sub>4-6</sub> 5 $\mathbf{B}_4$ 3 4 5 B<sub>10-6</sub> $\mathbf{B}_{10}$ B<sub>5-1</sub> 3 2 $B_5$ B<sub>10-7</sub> 2 4 $B_{10}$ 4 4 5 B<sub>5-2</sub> 3 $B_5$ B<sub>10-8</sub> $\mathbf{B}_{10}$ 3 2 B<sub>5-3</sub> 3 $B_5$ B<sub>11-1</sub> 1 $\mathbf{B}_{11}$ 2 2 B<sub>5-4</sub> 3 $B_5$ B<sub>11-2</sub> 5 $\mathbf{B}_{11}$ B<sub>5-5</sub> 5 4 $B_5$ B<sub>11-3</sub> 3 3 B<sub>11</sub> $B_{11}$ 2 B<sub>11-4</sub> 2 3 B<sub>5-6</sub> 4 $B_5$ 2 3 B<sub>5-7</sub> 4 $B_5$ B<sub>11-5</sub> 2 $\mathbf{B}_{11}$ B<sub>5-8</sub> 3 5 $B_5$ B<sub>11-6</sub> 2 4 $B_{11}$ 3 4 $B_{11}$ 2 $B_6$ 3 $B_{6-1}$ B<sub>11-7</sub> 2 $B_6$ 2 4 $\mathbf{B}_{11}$ B<sub>6-2</sub> 3 B<sub>11-8</sub> B<sub>6-3</sub> 4 3 $B_6$ B<sub>11-9</sub> 2 5 $\mathbf{B}_{11}$ 2 3 $B_6$ B<sub>12-1</sub> 3 2 $B_{12}$ B<sub>6-4</sub> 3 $B_6$ 5 3 $\mathbf{B}_{12}$ $B_{6-5}$ 4 $B_{12-2}$ 2 $B_6$ 2 3 $\mathbf{B}_{12}$ B<sub>6-6</sub> 4 B<sub>12-3</sub> 2 B<sub>6-7</sub> 4 $B_6$ B<sub>12-4</sub> 5 4 $B_{12}$ 4 5 B<sub>12-5</sub> 4 B<sub>12</sub> B<sub>12-6</sub> 3 $B_{12}$

#### 表 C1 各母线上的负荷信息 Table C1 Load information on buses

削水 D	附	录	D
------	---	---	---

#### 表 D1 具有职能耦合关系的负荷

Tab	Table D1 Loads with functional coupling		
负荷	职能关联的负荷	职能关联因子	
D	B <sub>1-2</sub>	0.2	
B <sub>2-3</sub>	B <sub>5-1</sub>	0.3	
B <sub>1-2</sub>	B <sub>5-4</sub>	0.3	
D	B <sub>2-3</sub>	0.2	
B <sub>3-2</sub>	B <sub>5-1</sub>	0.1	
D	B <sub>2-3</sub>	0.3	
B <sub>5-1</sub>	$\mathbf{B}_{3-2}$	0.1	
B <sub>5-4</sub>	B <sub>1-2</sub>	0.3	
B <sub>7-1</sub>	B <sub>9-1</sub>	0.4	
B <sub>9-1</sub>	$\mathbf{B}_{7-1}$	0.4	
$B_{11-1}$	B <sub>12-2</sub>	0.3	
B <sub>12-2</sub>	B <sub>11-1</sub>	0.3	

#### ...

#### 表 D2 优化决策得到的分区内恢复方案

Table D2 Optima	l restoration pla	n within partition	1
-----------------	-------------------	--------------------	---

进程序号	恢复时刻	恢复母线	恢复对象
1	02:00	DG1,B3,B4	DG1,B3-2,B4-2
2	02:05	$B_5, B_9$	$B_{5-1}, B_{9-1}, B_{3-1}$
3	02:10	$B_{11}, B_8, B_2$	$B_{11-1}, B_{8-5}, B_{2-3}$
4	02:25	$B_{12}, B_{10}$	B <sub>12-2</sub> ,B <sub>10-1</sub> ,B <sub>4-1</sub>
5	02:17	$\mathbf{B}_7$	$B_{7-1}, B_{8-1}, B_{9-2}$
6	02:22	$B_6$	$B_{6-1}, B_{5-3}, B_{7-3}$
7	02:25	—	$B_{3-4}, B_{11-2}, B_{10-2}$
8	02:26	—	$B_{1-2}, B_{10-4}, B_{8-3}$
9	02:28	—	$B_{1-3}, B_{5-4}, B_{3-3}$
10	02:28	—	$B_{9-4}, B_{6-3}, B_{10-2}$
11	02:29	—	$B_{1-1}, B_{4-3}, B_{12-1}$
12	02:30	—	$B_{7-4}, B_{5-2}, B_{2-2}$
13	02:30	—	$B_{11-4}, B_{8-4}, B_{7-5}$
14	02:31	—	$B_{3-5}, B_{1-5}, B_{11-5}$
15	02:33	—	$B_{12-3}, B_{6-4}, B_{2-1}$
16	02:34	—	$B_{1-6}, B_{9-3}, B_{10-6}$
17	02:35	—	$B_{6-2}, B_{4-4}, B_{11-3}$
18	02:36	—	$B_{18-2}, B_{5-6}$
19	03:30	—	$B_{7-6}, B_{12-5}, B_{9-6}$

注:每个恢复对象的操作时间取决于最短恢复路径上需要操作的设备数量,本文取 0~5 min 不等。

附录 E







图 E2 负荷职能完成度 Fig.E2 Load function completion



图 E3  $DG_1 与 DG_2$ 的出力预测与可控因子 Fig.E3 Output prediction and controllable factors of  $DG_1$  and  $DG_2$ 



Fig.E4 Dynamic trend of the restoration value of bus