

考虑频率电压空间分布特性的电网 实时减载及负荷恢复策略

李 晨¹, 张 昊², 周 济¹, 王国鹏², 孙大松³, 汤 奕³

(1. 国家电网有限公司电力调度控制中心, 北京 100031; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053;
3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 由于网络架构、机组参数和负荷特性等多种因素的影响, 故障后电网各节点的频率电压表现出一定的空间分布特性, 因此在不同节点实施稳控措施和负荷恢复策略对系统稳定性影响存在差异。同时, 应考虑频率、电压、有功及无功等多种强耦合性电气量的交互作用对负荷减载或恢复过程的影响, 以提高负荷调节效果。在此背景下, 提出一种新的基于负荷控制灵敏度指标的低频低压减载及负荷恢复策略, 该方法综合考虑频率电压的空间分布特性以及各种耦合电气量的交互特性。基于实际省级电网的时域仿真表明: 在负荷减载和恢复阶段, 根据负荷控制灵敏度指标的负荷调节策略均有利于电网稳定性提升。

关 键 词: 空间分布; 动态交互; 灵敏度; 低频/低压减载; 负荷恢复

DOI: 10. 19781/j. issn. 1673-9140. 2021. 02. 020 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2021)02-0162-10

Load shedding and load recovery strategy considering spatial distribution characteristics of frequency and voltage

LI Chen¹, ZHANG Hao², ZHOU Ji¹, WANG Guopeng², SUN Dasong³, TANG Yi³

(1. National Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 201196, China)

Abstract: Influenced by the power grid structure, generator parameters, and load characteristics, the post-fault frequency, and voltage at nodes reflect spatial distribution characteristics, resulting in different effects of the load shedding and load recovery strategy performed at different nodes on the system stability. Besides, the influence of the interaction between coupled electrical quantities of frequency, voltage, active power, and reactive power should be considered to improve the efficiency of the load regulation. In this paper, a novel load-control-sensitivity based low-frequency and low-voltage load shedding and load recovery strategy is proposed, which considers the spatial distribution characteristics of frequency and voltage, and the interaction of coupled electrical quantities. A time-domain simulation based on a provincial power grid shows the proposed load regulation strategy improves the power grid stability during the periods of both load shedding and load recovery.

Key words: spatial distribution; dynamic interaction; sensitivity; UFLS/UVLS; load recovery

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-11-04

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(SGTYHT/17-JS-199)

通信作者: 孙大松(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化等研究; E-mail: 220172683@seu.edu.cn

随着特/超高压电网的快速发展,电网的技术水平和复杂程度越来越高,加强电网调度能力,保证电网安全稳定运行水平变得日益迫切和重要。特/超高压线路大功率运行突发故障造成功率供需不平衡时,系统的频率电压会产生比较明显的过渡过程^[1]。为维持系统稳定并减小故障造成的冲击,电网调度人员需在故障初期实施相应的紧急减负荷控制方案,并于故障处置后期实施负荷有序恢复方案,减小给社会带来的负面影响。

电网故障后不同阶段涉及的大量负荷变化均会引起系统频率电压稳定性变化。由于网络架构、机组参数、负荷特性等因素的影响,分布于电网不同空间的各节点的频率动态响应特性各不相同;而电压作为局部状态量,其响应更与节点本地无功情况强相关,在暂态过程中其分布特性更加明显。频率和电压的空间分布特性^[2-4]由系统拓扑、参数、运行状态、扰动情况等造成,不同节点在扰动后响应特性的不同将影响在本节点部署的恢复措施执行效果。因此部署负荷减载或恢复措施时,需要考虑各节点的频率电压响应特性,以尽可能发挥控制措施对系统频率或电压的稳定效果。除空间分布特性外,复杂电力系统中频率与电压,有功和无功之间还存在动态交互影响。由于系统频率电压存在耦合关系,电网故障后还需同时考虑频率和电压的交互效应,从而制定更精准的负荷控制方案。

电网故障初期大功率缺失阶段,低频低压减载作为安全稳定第三道防线^[5],是保证系统快速恢复安全稳定并防止故障范围扩大的重要措施之一。目前关于低频低压减载的理论和算法^[6-8]研究很少考虑频率电压的空间分布特性,而且大部分文献^[9-12]的思路都是将频率和电压分别对待,虽然把频率和电压解耦可以简化分析,但是仅依靠频率或电压的单一判据而忽略各种电气量之间的交互作用,可能使该阶段切负荷时无法实现最优的控制效果,不利于系统频率和电压快速恢复。

故障处置后期电网恢复阶段,负荷恢复是系统调度运行的最终目的,该过程需要防范负荷投入后诱发新的频率问题的风险。现有关于负荷恢复的研究大多通过建立计及频率响应的优化潮流模型,聚

焦于网架重构后的负荷恢复过程^[13-16]。然而负荷的投入是一个复杂非线性的电力系统动态过程,仅考虑负荷的静态频率响应特性而忽略频率电压的交互影响,难以适用于负荷恢复阶段系统频率的动态特性分析,无法准确指导负荷的安全有序恢复。

针对上述不足,该文提出一种计及多种状态信息交互的减载及负荷恢复方法。利用该方法分析电网频率电压的空间分布特性以及各种耦合电气量的实时动态交互特性,提出负荷控制灵敏度指标,并将基于该指标指导电网故障后负荷的精准有序切除和恢复。针对省级电网通过算例进行仿真验证,结果表明,该文所提方法具有更好的控制效果。

1 考虑多种因素的负荷控制灵敏度指标

系统故障初期需考虑以较小的切负荷代价使故障系统的频率(电压)尽快恢复至运行允许范围,故障后期负荷恢复阶段则需考虑尽可能减小负荷投入过程对频率造成的冲击。而如果能获得准确的负荷特性^[17-20]将有助于减少切负荷代价的和提升负荷投入过程的频率恢复水平。对负荷特性的分析,一方面需要考虑不同空间分布负荷的自身调节特性差异,另一方面要计及频率、电压、有功和无功等电气量之间的交互影响。

1.1 负荷自身调节特性分析

当电力系统出现扰动后,发电机侧机械功率的调整总滞后于扰动造成的电磁功率变化,因此,系统中出现发电侧机械功率与用电侧电磁功率的不平衡,进而造成频率波动与电压波动^[21]。发电机侧通过发电机转子运动方程^[22],可以推导机械功率与电磁功率间功率缺额对系统频率的影响作用,即

$$T \frac{df}{dt} = A(t)[P_m - P_e(t)] \quad (1)$$

式中 T 为发电机组惯性时间常数; df/dt 为频率变化率; $A(t)$ 为等效系数; P_m 为发电机组机械功率,由于机组惯性较大,在较短时间尺度内可视作不变量; $P_e(t)$ 为随时间变化的电磁功率。

电网负荷从系统吸收的功率与系统频率和负荷本地电压均相关^[23]。当系统发生扰动后,由于频率和电压变化,负荷静特性将导致负荷自身的功率需

求也不断调整,可将负荷静特性导致的功率变化视作负荷的主动投切。将负荷通过自身调节能力而减少的有功和无功需求记作 $\Delta P(t)$ 和 $\Delta Q(t)$,则某节点的扰动后负荷功率可表示为

$$\begin{cases} P(t) = P_0 - \Delta P(t) \\ Q(t) = Q_0 - \Delta Q(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_0 、 Q_0 为初始时刻的有功、无功功率; $P(t)$ 、 $Q(t)$ 为扰动后的实时有功、无功功率。

综上,由于自身静特性负荷侧功率需求具备自主调节能力,有能力弥补一定的功率缺额。为充分利用负荷自身调节能力,在设计故障初期的减载策略时,可尽量保留自身调节能力较大的负荷,而在恢复阶段可优先投入此类负荷。利用负荷自身功率调节特性,既可减少减载策略中额外需投切的负荷量,降低事故影响,也可改善系统频率电压的恢复效果。

1.2 负荷就地状态信息交互影响分析

传统的电网稳定分析常将频率、电压、有功和无功先进行解耦,强调频率—有功和电压—无功的强相关关系,略去频率—无功和电压—有功的交互影响。而实际中频率、电压、有功及无功等各种电气量存在一定的交互作用,其中任一量变化都将对其余各量造成影响。例如,负荷节点无功功率对系统频率的影响过程为无功功率波动造成节点电压变化,继而造成负荷有功功率变化,并进而影响系统频率。

在系统扰动后的暂态过程中,可能出现 2 类典型负荷无功功率波动现象。

1) 负荷无功功率较初始值有所下降,可发生于静态负荷所占比例较大的电网中。无功负荷功率下降等效于负荷侧主动切除无功需求,对于不同节点具有相同的频率响应特性的负荷,无功需求减少越多,越有利于暂态过程中电压的恢复。电压回升将造成负荷有功功率需求增加,从而增大电网功率缺额,最终将导致频率进一步跌落。

2) 无功功率较初始值有所增加,可发生于感应电动机负荷所占比例较大的电网中。系统受到扰动后,由于感应电动机型负荷无功频率调节特性为负,扰动后对无功功率需求反而上升,将造成暂态电压进一步跌落,功率缺额增加,若无足够的无功支撑将造成电压崩溃^[24]。而暂态电压回升后,有功负荷的

增长则会导致后续频率的跌落。

因此,在设计负荷控制灵敏度指标时,应考虑无功波动对频率变化的影响。

1.3 基于负荷控制灵敏度指标的减载方案

文 1.1 中指出,优先利用自身调节能力弱、有功和无功功率随系统频率电压变化改变较少的负荷参与外加投切控制,可改进减载方案效果。以式(1)为参考,给出考虑多种有功、无功、电压等多因素的负荷控制灵敏度指标概念公式:

$$T'_L \cdot \frac{df}{dt} = \frac{P(t)}{P_0 - P(t)} \cdot \frac{Q_0}{Q(t)} \cdot \frac{U_0}{U(t)} \quad (3)$$

式中 T'_L 为负荷控制灵敏度指标; $P(t)$ 、 $Q(t)$ 和 $U(t)$ 分别为该负荷节点处有功、无功以及电压的实时数值; P_0 、 Q_0 和 U_0 分别为扰动发生时刻的初始有功、无功功率和电压值。

负荷控制灵敏度指标表征的是该负荷参与减载的优先程度,也可视作是一种“惯性常数”,其值由扰动后有功功率变化、无功变化和电压变化决定。当系统发生扰动导致频率或电压降低时,负荷有功变化量较小或电压水平较低的负荷节点优先参与减载,这些节点依据式(3)有较高的灵敏度。当节点的电压水平以及功频特性相近时,该点灵敏度指标由负荷无功功率的变化量决定。

对式(3)进行线性化和归一化,可得:

$$T_L \cdot \frac{1 - f_*(t)}{\Delta t} =$$

$$\frac{P_*(t)}{1 - P_*(t)} \cdot \frac{1}{Q_*(t)} \cdot \frac{1}{U_*(t)} \quad (4)$$

式中 T_L 为归一化负荷控制灵敏度指标; $P_*(t)$ 、 $Q_*(t)$ 、 $U_*(t)$ 和 $f_*(t)$ 均为以各相应初始值为基准的有功、无功、电压和频率归一化值; Δt 为采样计算的时间间隔。在实际计算中, T_L 具有时变的特点,为保证实施方案的实时性,对负荷控制灵敏度指标采用以固定时间间隔计算,就近取值的方法。固定时间间隔依靠每次灵敏度指标计算的时间和低频减载措施动作延时确定。考虑到故障后,电网可能出现的低电压、高频率的工况(极端情况下,频率偏差为 0 Hz),则利用节点的电压值代替相应的灵敏度指标值,因为节点电压值的大小在这种工况下能反映出负荷控制灵敏度的高低。

因此,对于每一条母线 i 可以得到其负荷控制灵敏度的表达式:

$$T_{Li} \cdot \frac{1 - f_{i^*}}{\Delta t} = \frac{P_{i^*}(t)}{1 - P_{i^*}(t)} \cdot \frac{1}{Q_{i^*}(t)} \cdot \frac{1}{U_{i^*}(t)} \quad (5)$$

基于得到的负荷控制灵敏度指标 T_L , 提出一种新的低频低压减载优化方案, 假设在传统的低频低压减载方案中, 有 n 条母线上装设有减载装置, 其中母线 i 在第 j 轮动作切除负荷的比例为 $a_{i,j}$, 一般由离线仿真确定, 则在新型低频/低压减载方案中, 母线 i 减载装置第 j 轮动作切除负荷的比例为

$$P_{LSi,j} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{oi} a_{i,j}}{P_{oi}} \cdot \frac{K_i}{\sum_{i=1}^{n-1} K_i} \quad (6)$$

式中 $K_i = (T_{Li} - T_{Lmin}) / (T_{Lmax} - T_{Lmin})$, 表示母线 i 的负荷控制灵敏度指标值 T_{Li} 相对于计算出的最小灵敏度指标值的距离; P_{oi} 为母线 i 的初始负荷量; $\sum_{i=1}^n K_i$ 为所有母线的 K_i 的和值。

1.4 基于负荷控制灵敏度指标的负荷恢复方案

系统故障导致部分负荷在低频低压减载阶段被实时切除后, 应该在满足电网基本稳定约束条件下, 尽可能快速、安全有序地恢复相关负荷。为避免负荷恢复过程造成频率大幅跌落引发次生灾害, 必须考虑负荷恢复量、负荷恢复次序与系统频率的关系, 有步骤地实施负荷精准恢复。

恢复阶段和减载阶段负荷控制后对频率影响呈现相反的趋势。由于负荷控制灵敏度指标表征了节点负荷变化与系统频率的关联强度。因此与减载阶段相反, 为减小频率跌落程度, 负荷恢复阶段需先恢复灵敏度较低的负荷。由于负荷恢复前相应负荷处于断开状态, 缺少式(3)中与负荷相关的电气量, 因此, 该文用减载阶段的负荷控制灵敏度确定恢复阶段的负荷恢复量。

新型的负荷恢复方案同样基于负荷控制灵敏度指标, 负荷控制灵敏度反映了负荷频率特性, 而恢复目标为使该阶段恢复负荷对系统频率影响最小, 因此, 该阶段优化目标为

$$\min \sum_{i=1}^n P_{LRi,j} T_{Li} \quad (7)$$

式中 $P_{LRi,j}$ 为母线 i 在 j 轮动作恢复负荷的比例。

由于每轮需恢复一定的负荷总量, 且各节点负荷恢复量需小于减载阶段的总切除量, 因此, 负荷恢复方案满足约束:

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^n P_{LRi,j} \geq P_{Lref,j} \\ P_{LRi,j} \leq \sum_{j=1}^k P_{LSi,j} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $P_{Lref,j}$ 为 j 轮所需恢复的负荷总量。

基于负荷控制灵敏度指标的计算, 负荷恢复过程中每个时间段内优化模型均为线性模型, 采用常规线性规划算法即可求解。

2 新型负荷减载及恢复方案流程

该文提出的负荷减载及负荷恢复方案的具体流程如图 1 所示。主要步骤:

- 1) 实时测量各母线的频率 f_0 、电压 U_0 、有功功率 P_0 及无功功率 Q_0 ;
- 2) 当系统发生扰动或者母线频率(电压)越过阈值时, 实时测量各母线的频率 $f(t)$ 、电压 $U(t)$ 、有功功率 $P(t)$ 及无功功率 $Q(t)$;
- 3) 母线 i 利用实测就地状态信息, 基于式(5)以固定时间间隔计算负荷控制灵敏度指标 T_{Li} , 并上传到地区调度控制中心;
- 4) 当母线 i 的频率(电压)跌落至低频(低压)减载装置第 j 轮动作启动值时, 地区调度控制中心按照最近的负荷控制灵敏度指标 T_{Li} 计算取值, 根据式(6)计算分配该母线该轮的切负荷量 $P_{LSi,j}$;
- 5) 经过预设延时, 低频(低压)减载装置动作, 切除负荷;
- 6) 若频率(电压)没有恢复, 则返回步骤 2, 直至母线的频率、电压恢复至可接受的水平之上;
- 7) 根据负荷减载量预设负荷恢复轮次;
- 8) 当频率恢复至第 j 轮负荷恢复动作启动值时, 根据式(7)、(8)计算母线 i 该轮恢复的负荷 $P_{LRi,j}$;
- 9) 经过预设延时, 装置动作, 恢复负荷;
- 10) 若负荷没有完全恢复, 则返回步骤 8, 直至负荷全部恢复。

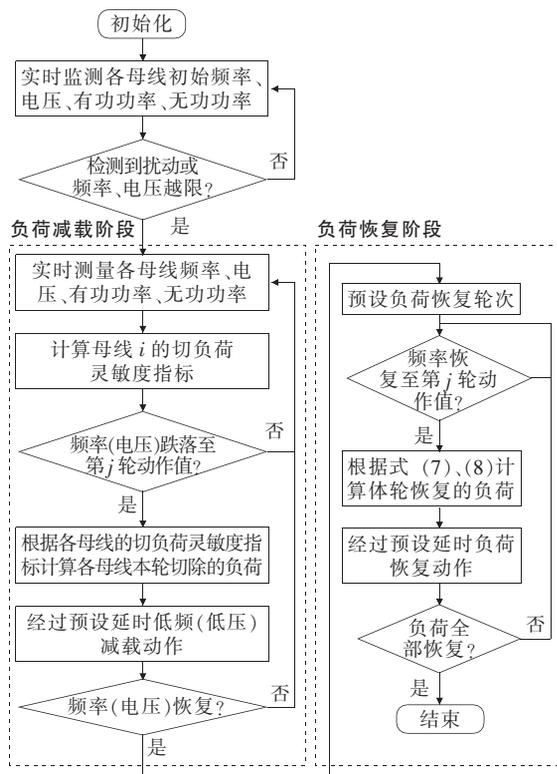


图1 计及多种状态信息交互的减载及负荷恢复流程

Figure 1 Flow chart of load shedding and recovery strategy considering multi-information interaction

3 算例分析

基于BPA仿真平台以及Matlab优化工具箱,分别在测试系统与武南—岷珠地区实际电网中对该文所提方法进行验证。

3.1 负荷控制灵敏度指标的仿真验证

以图2所示电网分析其灵敏度指标的有效性,该电网通过BUS₃至BUS₄双回500 kV线路与区域大型电网相连。电网内各母线的负荷量如表1所示。

在不同切除方案下,通过分析系统所有母线电压恢复到0.8 p. u.的临界恢复时间(critical recovery time, CRT)来证明电压跌落最大的节点不一定是控制最灵敏点。考虑预想故障:0.1 s时BUS₆母线发生三相短路故障,0.34 s时故障清除,故障清除后部分母线的CRT如表2所示。可见BUS₆母线电压最低,其临界恢复时间CRT为0.760 s。

考虑故障后0.4 s采取切负荷控制,若全切母线BUS₁(100 MW)、BUS₂(100 MW)、BUS₅(100 MW)和BUS₁₂(100 MW)所有负荷、其余母

线各切30 MW(共切除负荷520 MW),CRT为0.548 s。全切母线BUS₆(370 MW)、其余母线各切30 MW(共切除负荷580 MW)时的CRT为0.572 s。从全系统角度看,由于母线就地电压跌落信息难以体现不同负荷组成对事故后电压动态响应的反馈作用以及不同节点间的交互影响,只依靠就地电压跌落信息不一定准确找到对改善系统电压稳定最灵敏的节点。

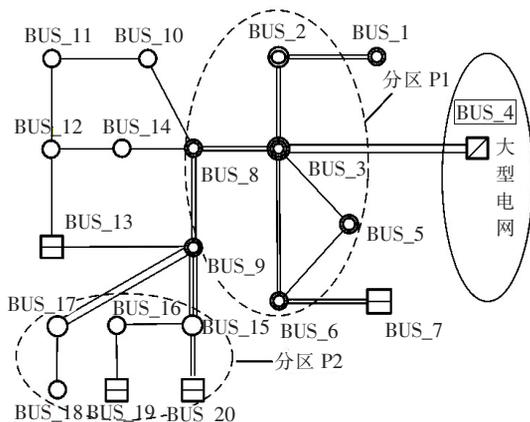


图2 测试系统的电网结构

Figure 2 Structure of test power system

表1 观察母线的负荷容量

Table 1 Load capacity of each bus

母线	有功负荷/MW	无功负荷/MVar	母线	有功负荷/MW	无功负荷/MVar
BUS ₁	100	35	BUS ₈	230	70
BUS ₂	100	35	BUS ₉	100	35
BUS ₅	100	35	BUS ₁₂	100	35
BUS ₆	370	12	BUS ₁₆	100	35

表2 部分母线电压临界恢复时间

Table 2 Partial bus voltage critical recovery time

母线	CRT/s	母线	CRT/s
BUS ₁	0.701	BUS ₈	0.736
BUS ₅	0.633	BUS ₁₂	0.741
BUS ₆	0.760	BUS ₁₆	0.615

同样,仅依赖就地频率信息也难以有效区分不同节点间的负荷控制灵敏度。考虑故障:0.1 s时该地区电网和省网的联络线BUS₃-BUS₄发生无故障双回线同时跳开故障,该地区孤网运行。考虑在故障后0.5 s时,分别切除BUS₂和BUS₁₆的相同负荷量,系统的频率变化曲线如图3所示,可以看出,切除母线BUS₁₆对系统的频率改善效果更好,

但 BUS_2 离故障点更近,根据扰动下机电波的传播,故障后 BUS_2 的低频减载装置可能先动作,或者动作较多轮次,而对系统频率恢复改善效果更好的 BUS_16 可能动作较慢或者动作较少轮次,而不能达到最好的切负荷效果。

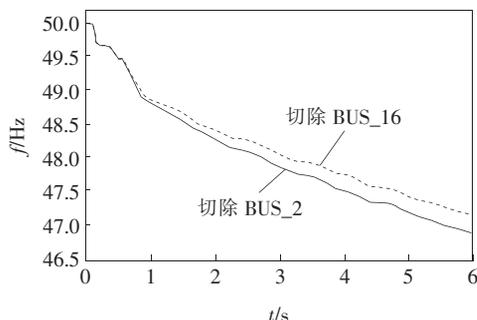


图 3 切除不同母线负荷后系统频率变化曲线

Figure 3 System frequency curve after shedding different bus load

进一步通过仿真分析该文所提负荷灵敏度指标的有效性。BUS_3 至 BUS_4 在 0.1 s 时发生三相短路故障,0.2 s 时故障清除,BUS_3 至 BUS_4 双回线同时跳开,该地区孤网运行,功率缺额 577 MW,约占该地区全部负荷的 41.0%。考虑不同负荷组成情况下,同一种故障可能导致的不同频率电压响应。

场景 1 仅频率跌落。故障后各观察母线的频率、电压曲线,如图 4、5 所示。各母线的频率、电压显示出一定的空间分布特性,将所选取的观察母线的负荷灵敏度指标在时间坐标轴上表示出来,如图 6 所示。假定 UFLS 首轮动作整定方案为[49.5 Hz, 0.3 s],选取负荷灵敏度最大的 BUS_16、BUS_9 和负荷灵敏度最小的 BUS_6、BUS_8 进行验证,分别切除母线 BUS_6、BUS_8、BUS_9、BUS_16 的有功负荷 100 MW,以 BUS_6 为例观察系统的频率响应曲线,如图 7 所示。

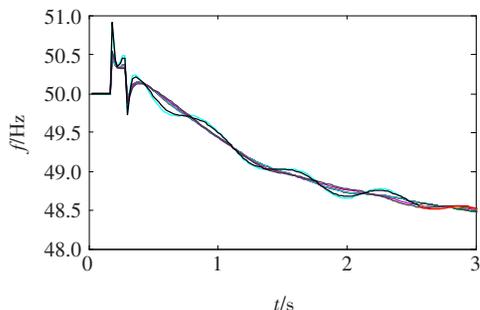


图 4 故障下系统各母线的频率响应曲线

Figure 4 Curves of system frequency during fault

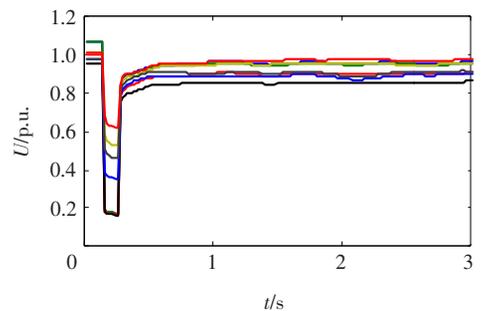


图 5 故障下系统各母线的电压响应曲线

Figure 5 Curves of system voltage during fault

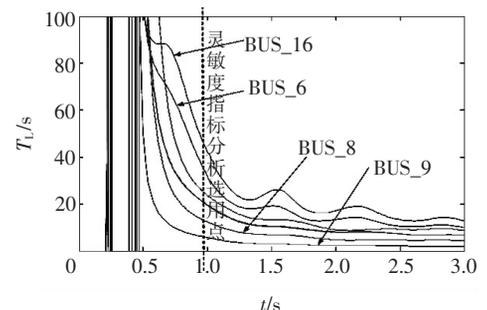


图 6 各观察母线的负荷灵敏度指标

Figure 6 Load control sensitivity index of each bus

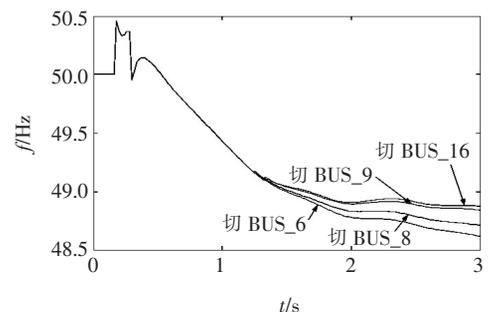


图 7 切除不同母线负荷时系统的频率响应曲线

Figure 7 Curves of system frequency when load shedding in different bus

可以看出,在切除相同负荷量的前提下,负荷控制灵敏度指标越大的母线切除负荷对于系统频率的恢复效果改善就越好。

场景 2 仅电压跌落。故障后各观察母线的频率、电压曲线,如图 8、9 所示。该故障下各母线的负荷灵敏度指标的动态变化值如图 10 所示。选取负荷灵敏度最大的 BUS_6、BUS_2 和负荷灵敏度最小的 BUS_9、BUS_16 进行验证,假定 UVLS 首轮动作整定方案为[0.85 p.u., 0.2 s],分别切除母线 BUS_2、BUS_6、BUS_9、BUS_16 的有功负荷 100 MW,以故障下电压跌落最低的 BUS_6 为例观察系统的电压响应曲线,如图 11 所示。

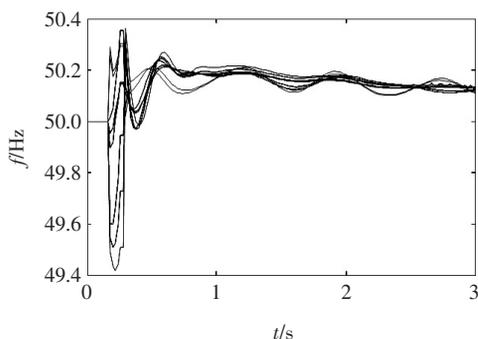


图 8 故障下观察母线的频率响应曲线

Figure 8 Curves of system frequency during fault

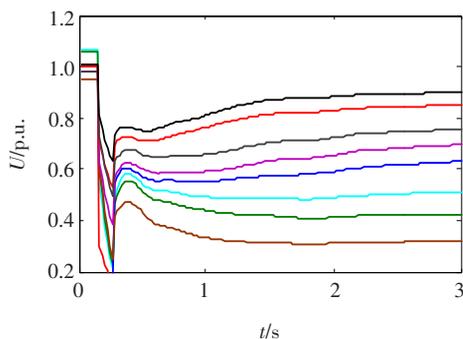


图 9 故障下观察母线的电压响应曲线

Figure 9 Curves of system voltage during fault

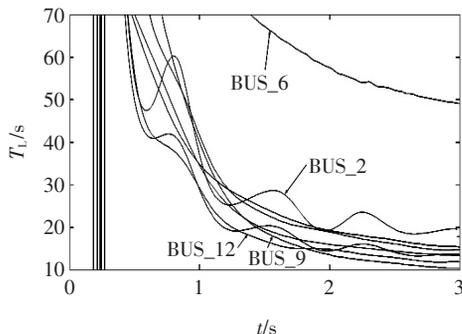


图 10 各观察母线的负荷灵敏度指标

Figure 10 Load control sensitivity index of each bus

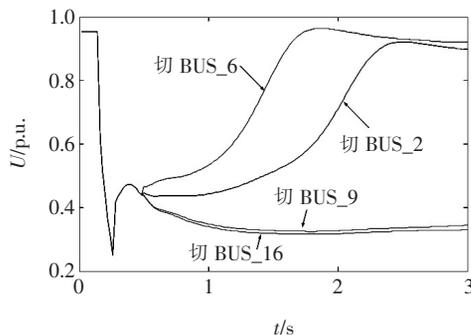


图 11 切除不同母线负荷时系统的电压响应曲线

Figure 11 Curves of system voltage when load shedding in different bus

可以看出,在故障后电压跌落的情况下,若考虑优先在负荷控制灵敏度指标较大的点切除负荷,则电压能够获得更快的恢复。

从仿真分析可以看出,对于电网故障后发生频率跌落或者电压跌落问题,该文所提的灵敏度指标都具备适用性,能够适应复杂的系统运行工况,根据实时的测量信息寻找到控制最灵敏的负荷节点进行优化控制,从而获得更好的恢复效果。

3.2 基于负荷控制灵敏度指标的实际电网减载与恢复方案仿真验证

针对如图 12 所示的江苏电网武南、岷珠地区电网,装机容量为 1 950 MW,负荷为 2 892 MW。考虑武南、岷珠地区电网和外部电网的 500 kV 联络线岷珠—廻峰在 0.1 s 时发生三相短路故障,0.2 s 时故障清除,武南—惠泉、岷珠—廻峰(双回线)、武南—妙西 4 回线同时断开,导致武南、岷珠地区孤网运行,功率缺额 759.4 MW,约占该地区全部负荷的 26.3%。选取节点美栖作为监测母线。

算例 A 考虑该地区负荷以静态负荷为主,故障后暂态电压快速恢复,低压减载不动作。基于式(5)计算各母线的负荷控制灵敏度指标,武南、岷珠地区各母线的负荷控制动态灵敏度指标变化曲线分别如图 13、14 所示。

基于式(6)计算各母线的减载方案,2 种减载方案下系统的频率响应曲线如图 15 所示,该文基于负荷控制灵敏度指标的减载和传统减载方案比例如表 3 所示。

算例 B 考虑该地区负荷以感应电动机负荷为主,故障后暂态电压快速跌落,而频率维持在额定值附近,传统低压减载和新型减载方案比例如表 4 所示,2 种方案下系统的电压响应曲线如图 16 所示。

从上述仿真中可以看到,不同于传统减载方案的均一切负荷方式,优化后的减载方案充分考虑了频率电压的空间分布特性,在各个节点基于负荷控制灵敏度指标采取差异化控制可有效改善系统频率(电压)的恢复效果。

优化后的方案可能导致部分灵敏度较高的节点减载比例较大,例如,在算例 A 中节点洛西减载比例达到了 100%,而 599 号令中以减供负荷的比例

表 4 传统低压减载和所提减载方案的负荷切除比例

动作电压和延迟	负荷切除比例															
	传统	新型(武南地区)								新型(岷珠地区)						
	所有母线	高新	漏湖	遥观	马杭	常州	中钢	运村	洛西	北塘	美栖	典巷	百家	王家	鹅洲	荆溪
[0.85 p. u., 0.2 s]	10	56.8	19.2	15.4	26.1	2.8	2.6	0	0	18.9	19.4	12.6	13.0	3.0	3.0	0
[0.80 p. u., 0.2 s]	5	28.4	9.6	7.7	13.1	1.4	1.3	0	0	9.4	9.7	6.4	6.5	1.5	1.5	0

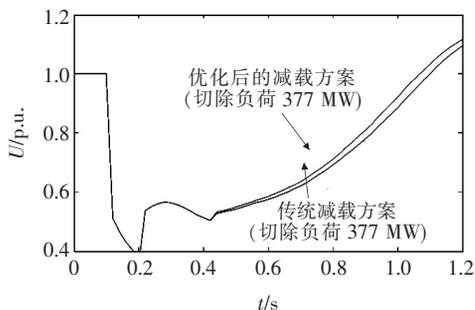


图 16 2种减载方案下系统的电压响应曲线

Figure 16 Curves of system voltage in different load shedding schemes

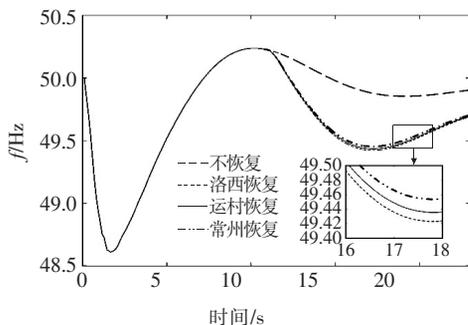


图 17 不同恢复方案下系统的频率响应曲线

Figure 17 Curves of system frequency in different load recovery schemes

需要指出的是,该算例中负荷恢复量相对较小,若针对特高压直流故障处置后期大规模负荷恢复问题,不同节点海量负荷的恢复次序对频率恢复水平的影响将会显著放大,该文方法可为大规模负荷恢复计划的制定提供更合理的参考和选择。

4 结语

该文基于负荷自身调节特性和各电气量的交互作用,提出了一种考虑多种因素影响的负荷控制灵敏度指标,可反映不同母线控制效果的差异性,可应用于制定低频低压减载量及负荷恢复量在各节点的

量化分配方案。仿真结果表明:基于负荷控制灵敏度的新型负荷减载及恢复方案在故障后不同阶段均能有效提高电网的频率(电压)恢复效果。

该文的负荷控制灵敏度指标是在定性分析系统频率、电压、有功、无功的关系后归纳总结得到的,一定程度上实现了系统电压与频率变化关系的耦合,而非对电网内各变量的准确描述,后续将进一步研究更精确的控制方法以提升负荷控制的效果。

参考文献:

- [1] 赵强,王丽敏,刘肇旭. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J]. 电网技术,2009,33(8): 35-40.
ZHAO Qiang, WANG Limin, LIU Zhaoxu. Study on dynamic frequency characteristics and coordinative under-frequency load shedding scheme for nationwide interconnected power grid of China[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 35-40.
- [2] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16):163-170.
LIU Wei. Design of a current measuring sensor with self-power supply function[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16):163-170.
- [3] 时伯年,孙刚,瞿艳霞. 柔性直流输电的孤网频率稳定协调控制[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(4): 137-142.
SHI Bonian, SUN Gang, QU Yanxia. Research on coordinated frequency stability control after islanding based on VSC-HVDC technique[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 137-142.
- [4] 吴雪莲,李兆伟,刘福锁,等. 大功率扰动下计及系统频率分布特性的紧急控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(3):104-114.
WU Xuelian, LI Zhaowei, LIU Fusuo, et al. Analysis of the emergency control strategy of system frequency con-

- sidering system frequency distribution characteristics under large power disturbance[J]. *Power System Protection and Control*,2021,49(3):104-114.
- [5] 潘晓杰,樊茂森,张文朝,等. 含水电系统的低频减载关键参数优化方法[J]. *中国电力*,2020,53(2): 76-82.
PAN Xiaojie, FAN Maosen, ZHANG Wenchao, et al. Optimizing method for key parameters of under-frequency load shedding for power system penetrated with hydropower[J]. *Electric Power*,2020,53(2): 76-82.
- [6] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. *电网技术*,2012,36(8): 1-5.
TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. *Power System Technology*,2012,36(8): 1-5.
- [7] 吴云亮,李晓璐,唐晓骏,等. 基于减载贡献因子的低频减载动态优化方法研究[J]. *智慧电力*,2019,47(1): 105-109.
WU Yunliang, LI Xiaojun, TANG Xiaojun, et al. Dynamic optimization of under-frequency load shedding strategy based on load shedding contribution factor[J]. *Smart Power*,2019,47(1): 105-109.
- [8] 侯玉强,方勇杰,杨卫东,等. 综合电压频率动态交互影响的自动减负荷控制新方法[J]. *电力系统自动化*,2010,36(5): 24-28.
HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of automatic load shedding control based on the voltage and frequency dynamics interaction[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2010,36(5): 24-28.
- [9] 李顺,廖清芬,刘涤尘,等. 计及电压稳定的自适应协调低频减载策略[J]. *电力自动化设备*,2017,37(12): 157-163.
LI Shun, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Adaptive coordinated low frequency load shedding strategy considering voltage stability[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2017,37(12): 157-163.
- [10] 王怀远,何培灿,温步瀛. 基于响应信息的分散式低频减载方案[J]. *电网技术*,2019,43(8): 2976-2982.
WANG Huaiyuan, HE Peican, WEN Buying. Decentralized under-frequency load shedding scheme based on response information[J]. *Power System Technology*,2019,43(8): 2976-2982.
- [11] 王凡,李海峰,胥国毅,等. 调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J]. *电力系统保护与控制*,2020,48(20): 1-8.
WANG Fan, LI Haifeng, XU Guoyi, et al. Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis[J]. *Power System Protection and Control*,2020,48(20): 1-8.
- [12] WANG Qi, TANG Yi, LI Feng, et al. Coordinated scheme of under-frequency load shedding with intelligent appliances in a cyber physical power system[J]. *Energies*,2016,9(8): 630.
- [13] 廖诗武,姚伟,文劲宇,等. 电力系统恢复后期网架重构和负荷恢复的两阶段优化方法[J]. *中国电机工程学报*,2016,36(18): 4873-4882.
LIAO Shiwu, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. Two-stage optimization method for network and load recovery during power system restoration[J]. *Proceedings of the CSEE*,2016,36(18): 4873-4882.
- [14] 刘文轩,顾雪平,王佳裕,等. 考虑系统安全因素的负荷恢复方案优化[J]. *电力系统自动化*,2016,40(12): 87-93.
LIU Wenxuan, GU Xueping, WANG Jiayu, et al. Optimization of load recovery scheme considering system security factors[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2016,40(12): 87-93.
- [15] 程艳,张健,管萸,等. HVDC换相失败时受端电网的电压与频率联合控制策略[J]. *高压电器*,2020,56(4): 241-245.
CHENG Yan, ZHANG Jian, GUAN Ti, et al. Coordinated control strategy of voltage and frequency support at receiving end of HVDC system under commutation failure[J]. *High Voltage Apparatus*,2020,56(4): 241-245.
- [16] 陈滢,杨苹,吕宇桦,等. 计及故障供电恢复策略的主动配电网电源规划[J]. *电测与仪表*,2020,57(16): 65-70.
CHEN Ying, YANG Ping, LYU Yuhua, et al. DG programming of active distribution network considering a strategy of power restoration from fault[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*,2020,57(16): 65-70.