

DOI: 10.7667/PSPC160582

基于灵敏度和潮流熵的线路过负荷控制策略

岳贤龙¹, 王涛², 顾雪平², 王佳裕², 仲悟之³, 高成彬⁴

(1. 国网冀北电力有限公司物资分公司, 北京 100075; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 4. 山东省电力公司烟台市电力公司, 山东 烟台 264000)

摘要: 针对电网运行中线路过负荷可能引发的连锁过载跳闸问题, 提出一种基于灵敏度分析和潮流熵的紧急控制模型。基于模糊多属性决策法综合灵敏度、潮流熵和节点自身功率水平提出节点功率调整指标, 能够将决策专家的定性分析与定量分析相结合。根据节点功率调整指标以及节点类型形成功率调整节点集和功率平衡节点集, 并提出了兼顾电网的局部过负荷问题和全局运行水平的线路过负荷紧急控制优化模型, 通过多轮次系统功率调整可高效完成线路过负荷紧急控制。对 IEEE39 节点系统标准算例和河北南网系统的仿真结果证明了模型的正确性和有效性。

关键词: 线路过负荷; 紧急控制; 潮流熵; 灵敏度分析; 模糊多属性决策

Control strategy for line overload based on sensitivity and power flow entropy

YUE Xianlong¹, WANG Tao², GU Xueping², WANG Jiayu², ZHONG Wuzhi³, GAO Chengbin⁴

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd Material Branch, Beijing 100075, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 4. Yantai Electric Power Company, Shandong Electric Power Company, Yantai 264000, China)

Abstract: To solve the problem of line overload which may cause cascading trip-outs of transmission lines when the power system is servicing, an emergency control model is established based on sensitivity analysis and power flow entropy. Indicator of power adjustment is proposed using fuzzy multi-attribute decision making method which can combine qualitative analysis with quantitative analysis of decision-making expert on basis of overall consideration of sensitivity, power flow entropy and the bus power level. Bus set of power adjustment and power balance can be formed with indicator of the bus power adjustment and the bus type, and an optimization model for line overload emergency control is proposed, which takes into account the local grid overload problems and the global operation level of power system. The model can efficiently adjust line overload emergency control by multiple rounds. The validity and efficiency of this method have also been verified by simulation results of IEEE 39-bus standard system and Hebei South network system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277076) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2016MS130).

Key words: line overload; emergency control; power flow entropy; sensitivity analysis; fuzzy multi-attribute decision

0 引言

现代电网在追求高经济效益的同时往往会降低系统运行裕度, 尤其对于大容量、远距离互联电网, 发电端与受电端之间需要输送更多的功率, 致使联

络线负载较重^[1-4]。若一条线路过载而退出运行, 潮流转移可能会使得其他线路过载而退出运行, 引发连锁故障, 进而造成更大的经济损失^[5-6]。因此, 当面临线路过负荷引发连锁过载跳闸事故的风险时, 需采取快速、有效的紧急控制措施, 使系统恢复到安全运行水平。

近年来, 人们对消除线路过载的控制措施进行了较多研究, 其中, 切机与切负荷控制是目前较为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277076); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016MS130)

成熟的过载消除紧急控制措施。文献[7]基于广域测量系统提出了预防连锁跳闸的切机、切负荷控制策略, 综合利用全网同步动态信息, 较大的数据量致使其不易适应快速发展的连锁故障; 文献[8]利用慢同调、Laplace 和启发式邻域搜索方法进行动态分区, 并采用就近启发式策略调整发电机、消减负荷, 减小了搜索空间, 未计及系统全局的稳定性; 文献[9]根据相对动能计算切机控制量, 适应性与灵活性较好, 但是切机量较大, 经济性差; 文献[10]利用非线性系统稳定域边界理论和稳定控制措施寻找切机、切负荷紧急控制方案, 大大降低了计算量, 但是过于依赖主导不平衡点; 文献[11]利用潮流追踪算法对线路过负荷进行切负荷紧急控制, 对防止连锁过载跳闸事故具有重要的意义。在已有研究成果中, 紧急控制策略主要是“离线决策, 在线匹配”, 但易存在运行方式不适应的问题, 可能会引起策略误判。

灵敏度分析法在电力系统分析控制中具有广泛的应用, 而且计算速度快。文献[12]通过最优紧急控制模型求取最优切机量和切负荷量, 将灵敏度成功引入到紧急控制中, 模型存在较大的主观性; 文献[13-14]分别综合负荷节点电压灵敏度和短路电流灵敏度以及功率缺额灵敏度获取控制对象的优先级, 以便确定切负荷调整顺序, 从而提高系统在线控制水平; 文献[15]基于控制节点对输电断面潮流调整的综合灵敏度求取节点的调整顺序, 侧重考虑节点对过载线路群的影响, 未计及节点自身的调整能力; 文献[16]基于轨迹灵敏度分析了负荷切除对系统电压稳定性的影响, 可实现自适应切除线路潮流; 文献[17]利用功率灵敏度获取线路过负荷紧急控制策略, 并依托电网拓扑结构对广义潮流转移区域进行划分, 缩小了系统计算范围。上述方法能有效缓解线路过负荷状态, 但线路过负荷紧急控制除了要快速缓解过负荷威胁, 还需保证切负荷量较小, 以及能有效防止可能的连锁故障。因此, 计及系统全局的线路过负荷紧急控制需要进一步研究。

本文基于模糊多属性决策法提出一种线路过负荷紧急控制策略, 综合灵敏度、潮流熵和节点自身功率水平定义了节点功率调整指标, 进而划分系统当前运行状态下的功率调整节点集和功率平衡节点集, 物理概念明确。基于灵敏度分析方法的快速性和定量性特征以及潮流熵的可靠性高和计算效率高的优势, 利用紧急控制优化模型对系统功率进行多轮次调整, 不仅能够使线路达到安全运行, 也能够使系统整体运行水平保持稳定。最后, 以 IEEE 39 节点系统和河北南网实际系统为算例进行仿真和分

析, 验证了模型的正确性和有效性。

1 节点功率调整指标

1.1 节点功率对线路有功功率的灵敏度计算

节点对线路有功功率的调节能力可以通过灵敏度体现。基于潮流计算的灵敏度分析方法能够得到节点对线路有功功率的灵敏度, 灵敏度分析的数学表达式表示如下:

$$F(\mathbf{X}, \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

式中, \mathbf{X} 和 \mathbf{U} 分别为系统的状态向量和控制向量。

对式(1)中控制向量求取全微分, 转化为

$$\frac{\partial F}{\partial \mathbf{X}} \cdot d\mathbf{X} + \frac{\partial F}{\partial \mathbf{U}} = 0 \quad (2)$$

对式(2)整理, 得到控制变量对状态变量的灵敏度矩阵:

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\mathbf{U}} = -\left(\frac{\partial F}{\partial \mathbf{X}}\right)^{-1} \cdot \frac{\partial F}{\partial \mathbf{U}} \quad (3)$$

利用直流潮流法, 线路潮流可通过线路首末节点电压相角差与线路电抗得到, 即

$$P_L = \frac{\delta_i - \delta_j}{x_L} \quad (4)$$

式中: δ_i 和 δ_j 分别为线路首末节点电压相角; x_L 为线路电抗值。

结合式(3)和式(4), 各节点有功出力或负荷对线路潮流的灵敏度为

$$\lambda = \frac{dP_L}{dP} = \frac{1}{x_L} \left(\frac{d\delta_i}{dP} - \frac{d\delta_j}{dP} \right) \quad (5)$$

式中: P 为控制向量 \mathbf{U} 中的节点注入功率; $d\delta_i/dP$ 和 $d\delta_j/dP$ 分别为线路首末节点电压相角对节点功率的灵敏度, 可利用式(3)获取。

由式(5)可知, 对于某条过负荷输电线路, 选取灵敏度较大的节点群进行调节, 可以实现调整量较小和调整目标更优的效果。

1.2 节点对线路功率调整作用的相关性分析

对于过负荷运行状态下的线路来说, 切机切负荷的目的是使线路的负载率下降, 防止系统连锁跳闸事故。考虑到切机切负荷的控制效果, 若节点功率的变化对线路潮流几乎没有影响, 说明这些节点是功率关联比较小的节点, 那么这些节点应该在选择时被忽略。进一步, 节点功率变化对线路负载率的影响还存在正影响和负影响的问题。如果切机切负荷选择不合适, 部分节点的切机切负荷反而会造成线路负载率上升, 达不到功率控制的目的。例如, 对于一个带有少量负荷的联络节点, 针对该节点负荷功率的切除无疑会增大那些流出功率线路的潮

流。因此,分析节点对线路功率调整作用的相关性不仅要分析相关性的尺寸,也要分析节点功率变化对线路功率的调节方向。

负荷节点和具有调节能力的发电机节点通过如下方法确定,分别对节点增加单位负荷,观察线路潮流的变化情况^[18],节点*i*受到单位扰动冲击后线路*L*负荷变化为

$$\Delta P_L = P_L^i - P_L \quad (6)$$

式中: P_L 为线路*L*的初始潮流; P_L^i 为节点*i*增加单位负荷后线路*L*的潮流; ΔP_L 为线路*L*的潮流变化量。

式(6)中, ΔP_L 的尺寸可以度量节点对线路功率调整作用的相关性尺寸,若为正,说明节点*i*对线路*L*的功率调整方向为正相关;若为负,则为负相关;此外,若 ΔP_L 小于功率差额极限 P_{EPS} ,则可以认为节点*i*的功率增减与线路*L*的潮流不相关,即不具备功率调节能力。

1.3 模糊多属性决策法

模糊多属性决策法是一种将定性分析与定量分析相结合的方法,能够较好地体现专家进行判断和综合思维决策的基本特征,保证了决策信息分析的系统性和合理性,更能体现决策的实际情景^[19],因此,引入该理论求取不同影响因素的权重值。

首先,利用梯形模糊数表征专家对影响因素的定性评价,进而构造模糊互补判断矩阵 $R_{n \times n}$,其中,基于MacCrimmon提出的两极比例理论将专家给出的定性指标转换为梯形模糊数表示的定量指标^[20],如表1所示。

表1 定性评价与梯形模糊数对照表

Table 1 Corresponding chart of qualitative evaluation and trapezium fuzzy numbers

定性属性	模糊数	定性属性	模糊数
很不重要	(0,0,0,0.2)	较重要	(0.6,0.8,0.8,1)
不重要	(0,0,0.1,0.3)	重要	(0.7,0.9,1,1)
较不重要	(0,0.2,0.2,0.4)	很重要	(0.8,1,1,1)
一般	(0.3,0.5,0.5,0.7)	—	—

根据梯形模糊数的定义, $R_{n \times n}$ 中元素 $R_{ij}=(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$,需要对专家所给模糊互补判断矩阵进行一致性检验,即

$$\rho = \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=1}^n |r'_{ij} + 0.5 - r'_{ik} - r'_{kj}| \quad (7)$$

式中: $a_{ij}=b_{ij}=c_{ij}=d_{ij}$ 时, $r'_{ij}=a_{ij}$;否则,按照以下方法求解,即

$$r'_{ij} = \frac{c_{ij}^2 + d_{ij}^2 - a_{ij}^2 - b_{ij}^2 + d_{ij}c_{ij} - a_{ij}b_{ij}}{3(c_{ij} + d_{ij} - a_{ij} - b_{ij})} \quad (8)$$

若 $\rho < 0.2$,则认为专家所给的模糊判断矩阵满足一致性检验^[21];否则,需要重新校正,直至满足条件为止。

若存在*R*个专家进行评估,在*R*个判断矩阵均满足式(7)一致性条件下,综合*R*个专家后的评估信息为

$$R'_{ij} = \left(\frac{1}{R} \sum_{k=1}^R a_{ij}^k, \frac{1}{R} \sum_{k=1}^R b_{ij}^k, \frac{1}{R} \sum_{k=1}^R c_{ij}^k, \frac{1}{R} \sum_{k=1}^R d_{ij}^k \right) \quad (9)$$

那么,第*i*个影响因素的评价结果为

$$\omega'_i = \frac{1}{4} \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}} + \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij}} + \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}} + \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \right) \quad (10)$$

对式(10)计算结果归一化,得到第*i*个影响因素的权重为

$$\omega_i = \frac{\omega'_i}{\sum_{k=1}^n \omega'_k} \quad (11)$$

1.4 节点功率调整综合指标

当线路处于重载(超过线路热稳定极限的90%)或处于过负荷状态时,需要采取控制策略降低线路潮流,使其进入安全运行状态。在负荷控制调整过程中,既需要考虑节点本身的功率调节能力,又需要考虑调整策略对系统全局的影响。

节点对线路功率的调整能力可通过线路对节点有功功率的灵敏度来表征;节点自身的功率调节能力可以通过调节量与节点负荷功率或者发电机有功出力的比值来确定;电网全局运行性能则可以体现为电网潮流分布均匀度,该属性利用电网潮流熵度量^[22]。潮流熵能够定量描述系统线路潮流分布的不均衡性,具有可靠性高和计算效率高的优势,对电网连锁故障的传播具有重要影响,系统功率分布越均匀,潮流熵就越小,系统不易发生连锁故障;系统功率分布越不均衡,潮流熵就越大,一旦系统出现扰动,负载率高的线路可能过载甚至触发连锁故障。因此,潮流熵可以度量采用紧急控制措施后系统对抗连锁故障威胁的能力,是电网全局运行性能的体现。

根据以上分析,得到节点*i*的节点功率调整综合指标向量,如式(12)。

$$\omega_i = \omega_l R_i + \omega_H \frac{1}{H_i} + \omega_p \frac{1}{\Delta p/p_i} \quad (12)$$

式中: ω_l 为节点*i*对系统线路集的节点功率调整综

合指标向量; ω_l 为灵敏度权重影响因子; R_i 代表节点 i 对所有线路的灵敏度向量; ω_H 为潮流熵权重影响因子; H_i 代表节点 i 对所有线路的潮流熵向量, 先按照 1.2 节中增加单位负荷的调整方法对节点 i 进行调整, 再依据潮流熵理论求取; ω_p 为节点自身调节能力权重影响因子; $\Delta p/p_i$ 代表节点功率调整量占节点本身功率的比重向量, 表示为节点 i 对所有线路的向量形式; 权重影响因子利用 1.3 节中模糊多属性决策法确定。

2 线路过负荷紧急控制优化

线路过负荷紧急控制过程主要包括功率调整节点集与功率平衡节点集的形成; 确定节点集的调整优先顺序; 根据节点集以及优化模型对线路过负荷问题进行优化控制。

2.1 确定功率调整节点集和节点集调整优先顺序

线路过负荷紧急控制不能对所有节点的功率同时进行调整^[23], 因此需要筛选出优先进行功率控制的节点, 将参与功率紧急控制的节点分为功率调整节点和功率平衡节点。功率调整节点为系统中的负荷节点, 这些节点负荷的减小应能快速、有效地降低线路过负荷的破坏风险, 使系统达到一个安全的运行状态; 功率平衡节点为系统中除去功率调整节点后的节点功率调整综合指标较大的具有功率调节能力的非联络节点。

采用分层筛选法划分功率调整节点集。首先, 计算所有节点的功率调整综合指标, 选出满足灵敏度阈值条件的节点; 然后, 筛选负荷节点和发电机节点, 如 1.2 节中所述, 去除 ΔP_L 中小于功率差额极限 P_{EPS} 的节点, 即没有功率调节能力的联络节点, 其将不参与排序; 最后, 筛选出负荷节点, 本文功率调整对象主要为负荷节点。根据该方法可以得到功率调整节点集, 包含各节点功率调整综合指标及其排序。其中, 按照功率调整节点集对系统调整功率后将产生功率缺额, 再由功率平衡节点集来平衡功率缺额。

对于节点集的调整优先顺序: 第一, 根据节点集中的节点功率调整综合指标, 分配各个节点的功率调整量, 同时按照 1.2 节中方法获取节点对线路功率调整作用的相关性, 以此对节点功率分别进行增减; 第二, 按功率调整节点集调整结束后, 对于产生的功率缺额, 利用功率平衡节点集进行补充调整, 将系统的功率变化量平均分配到各个节点, 以此来平衡系统中的功率缺额。

2.2 线路过负荷紧急控制优化模型

线路过负荷紧急控制的目标是快速降低过负荷线路潮流, 通过功率调整措施, 改变系统的运行状态, 使线路达到安全运行的水平, 防止因该线路退出运行引发线路连锁跳闸事故。一方面, 在功率调整节点集选取中已考虑了 1.1 节中的灵敏度, 能够保证节点集功率调整量较小; 另一方面, 模型需考虑系统整体运行水平与节点本身功率限制。因此, 定义线路过负荷紧急控制优化模型及约束条件为式(13)和式(14)。

$$\min f = \omega_1 \left| \frac{P_L}{P_L^{\max}} - r_{obj} \right| + \omega_2 H_i \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Delta P_k^{\min} \leq \Delta P_k \leq \Delta P_k^{\max} \\ P_k^{\min} \leq P_k \leq P_k^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式(13)中: P_L 为线路 L 的潮流功率; P_L^{\max} 为线路 L 的热稳定功率极限; r_{obj} 为调整后欲达到的负载率; H_i 为第 i 次调整后系统的潮流熵^[22], 度量采用紧急控制措施后系统对抗连锁故障威胁的能力; ω_1 为过负荷线路安全性在目标函数中重要性的权重; ω_2 为每次调整后系统全局运行安全性在目标函数中重要性的权重, 两者分别从局部与全局角度体现系统的安全性, 权重影响因子利用 1.3 节中模糊多属性决策法分别确定其值的大小。式(14)中: ΔP_k^{\min} 和 ΔP_k^{\max} 分别为节点 k 功率调整量的下限和上限; P_k^{\min} 和 P_k^{\max} 分别为节点 k 的功率下限和上限。

该优化模型物理意义为: 式(13)中第一项代表经过功率调整控制后, 目标线路负载率达到期望值的程度, 该值越小越接近; 第二项代表功率调整过程中系统潮流的分布情况, 体现了系统对抗连锁故障威胁的能力, 是电网全局运行安全性能的体现。通过调整 ω_1 、 ω_2 可以协调控制局部线路负载率与系统全局运行的安全。若 ω_2 其取值为 0 或者较 ω_1 小, 则表示控制目标仅考虑或者重点关注降低待控制线路的负载率; 若 ω_2 取值较 ω_1 大, 则表示重点关注调整后系统运行的安全水平以降低系统发生连锁故障的风险。因此, 可以依据电网的实际控制需求适当调整 ω_1 和 ω_2 , 以便达到最终预期的调整效果。

在 1.4 节中, 节点功率调整指标同时考虑了节点的局部调整能力和全局调整效果, 2.1 节中按照指标确定了功率调整节点集和功率平衡节点集, 因此, 根据节点的功率调整综合指标分配功率调整量, 采取分次调整的策略, 直到系统达到安全运行状态为

止, 这样既可以保证系统不产生大的功率波动, 又可以得到式(13)中优化问题的一个最优解。

此外, 为了评价与对比每轮次功率调整控制后的效果, 参考文献[24], 定义系统状态安全指标为

$$V = R \cdot H \quad (15)$$

式中: R 代表线路在当前轮次功率调整结束后的负载率; H 代表调整之后系统的潮流熵。这两个参数反映了调整后系统的局部效果和整体效果, 其中, 线路负载率越小, 局部调整效果越优; 系统的潮流熵越小, 系统功率分布越均匀^[22], 整体调整效果越优, 那么, 该指标 V 越小, 则调整效果越佳, 反之, 其调整效果越差。

3 线路过负荷紧急控制流程

线路过负荷紧急控制流程如图 1 所示。

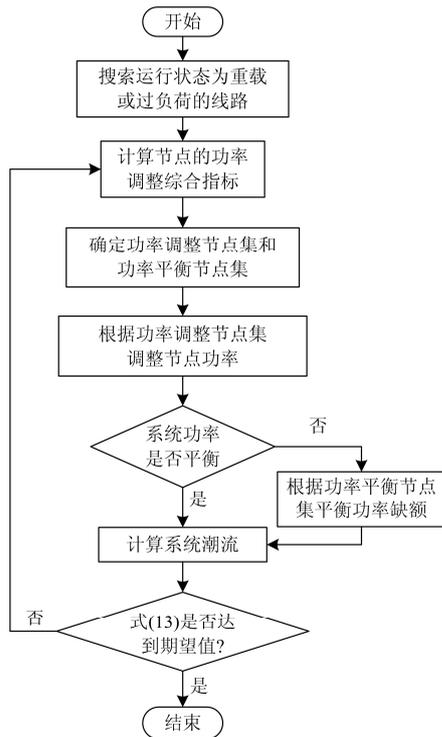


图 1 线路过负荷紧急控制流程

Fig. 1 Emergency control procedures of the line overload

该方法主要包括以下步骤:

1) 当线路处于重载(超过线路热稳定极限的90%)或处于过负荷状态时, 启动线路过负荷紧急控制程序, 辨识需要消除过载的线路。

2) 计算节点的功率调整综合指标。该指标包括线路对节点的灵敏度 R_i 、节点 i 调整功率后系统的潮流熵 H_i 以及节点功率调整量占节点本身功率的比重 $\Delta p/p_i$ 。该步骤中, 灵敏度 R_i 通过离线计算,

在系统运行状态发生变化的时候对其进行更新; 潮流熵和节点功率调整量占节点本身功率比重 $\Delta p/p_i$ 根据实际潮流计算, 最后, 根据式(12)计算节点的功率调整综合指标。

3) 确定功率调整节点集和功率平衡节点集。根据节点功率调整综合指标进行排序, 利用 2.1 节中分层筛选的方法得到功率调整节点集; 功率平衡节点集由剩余的节点功率调整指标较大的非联络节点构成。

4) 功率调整控制。按照功率调整节点集排序对节点功率进行调整, 如果系统功率平衡, 则进行下一步; 如果系统功率出现差额, 则按照功率平衡节点集排序, 将差额功率分配到功率平衡节点集中的节点上。

5) 在 2.2 节中优化模型的约束下, 对系统的节点功率调整结束之后, 计算潮流。判断式(13)中线路的负载率和系统潮流熵是否达到期望水平, 如果未达到, 则需要返回步骤 2)进行下一轮紧急控制。整个调整过程中, 视线路潮流水平会进行多次调整, 直到满足条件为止。

4 算例分析

分别以 IEEE39 节点系统和河北南网系统为算例, 采用 Matpower 进行仿真计算, 验证本文线路过负荷紧急控制优化模型的有效性和正确性。

4.1 IEEE39 节点系统仿真分析

IEEE39 节点系统含有 10 个 PV 节点, 28 个 PQ 节点, 节点 31 为平衡节点, 系统如图 2 所示。

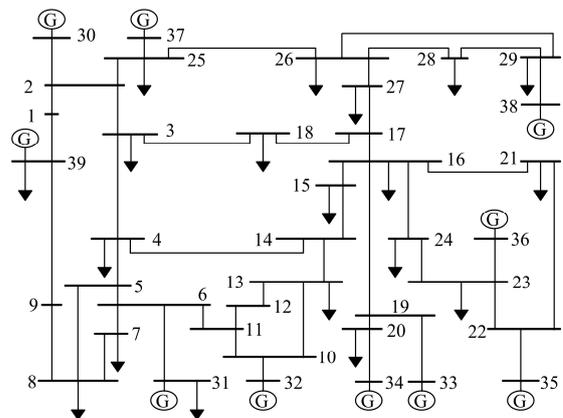


图 2 IEEE39 节点系统接线图

Fig. 2 Connection diagram of IEEE 39-bus system

根据 1.3 节中模糊多属性决策法计算得到灵敏度的权重因子为 0.45, 潮流熵的权重因子为 0.32, 节点自身调节能力的权重因子为 0.23。

为了仿真验证过负荷控制策略的有效性, 取文

献[25]中 IEEE39 节点系统基态潮流数据的 1.5 倍。计算潮流之后, 线路 16-19 的负载率为 101.11%, 且该线路退出运行之后, 节点 19、20、33、34 将脱离主网络, 并导致系统潮流不收敛。针对该线路, 采取紧急控制措施, 使其达到一个安全的运行状态, 同时保证系统的运行水平较佳。设定期望达到的负载率为 85%, 达到该负载率线路上需要降低的功率为 96.66 MW, 采用 2.2 节中的优化控制模型调节系统功率达到此目标。对于每一轮调整, 筛选针对线路 16-19 的功率调整节点集和功率平衡节点集, 先选取对该线路有功功率灵敏度绝对值大于 0.015 的节点, 这些节点针对线路 16-19 的功率调节能力最大, 再计及节点功率调整后的系统潮流熵和节点功率自身的调整能力, 得到节点功率调整综合指标。

当前运行方式下, 第一轮调整时, 满足灵敏度条件的节点分别为 15, 16, 17, 19, 20, 24, 33 和 34, 节点的功率调整综合指标信息如表 2 所示。

表 2 功率调整节点集信息

Table 2 Information of power adjustment nodes

节点号	灵敏度值	功率调整综合指标
15	-0.0185	1.4273
16	-0.0205	1.4287
17	-0.0162	1.4045
19	0.8801	2.3496
20	0.9022	2.4171
24	-0.0185	1.3520
33	0.9278	2.3488
34	0.9252	2.3079

表 2 中, 节点 33 和 34 为发电机节点, 节点 17 和 19 为联络节点, 均不参与负荷功率调整, 剩余节点将参与当前运行状态下的功率调整。根据节点功率调整综合指标确定每个节点的功率调整量, 节点 15, 16, 20 和 24 的调整量分别为 8.65 MW、8.66 MW、16.16 MW 和 8.08 MW, 依据功率调整节点集和功率平衡节点集对系统的节点功率进行调整, 计算潮流后如果式(13)达到期望值或者最优, 则控制结束; 如果未达到期望值, 则与上述第一轮调整过程相似, 进行下一轮的调节, 直至达到目标为止, 每一轮的调整效果如图 3 所示。

为了对比本文优化控制模型的可行性和有效性, 采用基于潮流追踪的方法对接近过负荷状态的线路进行紧急控制, 以便于对比两种方法的优劣。在基于潮流追踪的优化控制方法中, 首先对系统进行潮流追踪, 即得到发电机、线路、负荷的功率贡献和汲取关系。针对欲进行控制的线路, 分析对该线路贡献功率的发电机和从该线路汲取功率的负

荷, 对这些节点进行功率调整, 从而达到降低线路负载率的目的, 两种方法的功率调整效果对比如图 3 所示。

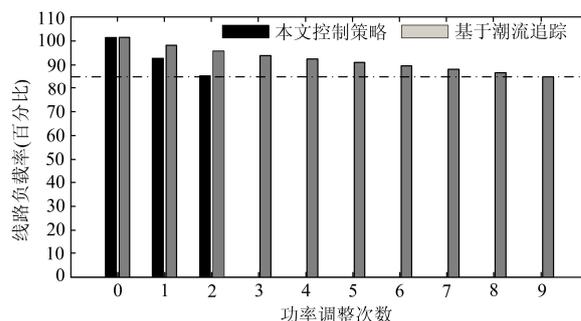


图 3 IEEE39 节点系统功率调整效果对比

Fig. 3 Contrast of power adjustment for the IEEE 39-bus system

由图 3 可见, 本文的控制模型在第 2 次功率调整后达到了期望的负载率(85%), 其中调整阈值为 3%, 并且线路负载率的下降速度更快。而在基于潮流追踪的控制方法下, 线路负载率下降速度较慢, 在第 3 次调整之后线路负载率下降相对较慢, 直至第 9 次功率调整之后达到了调整阈值范围。说明本文优化控制模型在处理线路过载时相对更加高效。

在线路过负荷控制问题中, 线路负载率是一个很重要的因素, 而且电网全局的运行水平也是要考虑的一个因素。根据式(15)得到两种方法的调整性能, 功率调整性能对比如图 4 所示。

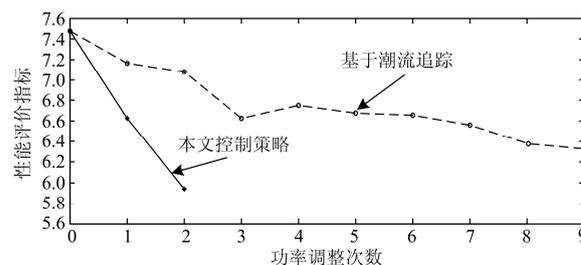


图 4 IEEE39 节点系统电网性能对比

Fig. 4 Contrast of the power grid performance for the IEEE 39-bus system

由图 4 可见, 本文紧急控制模型的性能评价指标处于基于潮流追踪控制方法的下方, 且下降的速度较快; 而基于潮流追踪方法的性能评价指标在前 3 次调整后速度减缓, 之后的调整效果不是很明显。可见, 在过负荷紧急控制问题上, 该模型在局部控制以及整体性能上是合理有效的。

4.2 河北南网系统仿真分析

为了进一步验证该紧急控制优化模型的有效性, 对河北南网系统进行仿真分析, 选定的系统含

有 36 个 PV 节点, 232 个 PQ 节点, 上安电厂为平衡节点, 500 kV 主干网如图 5 所示。

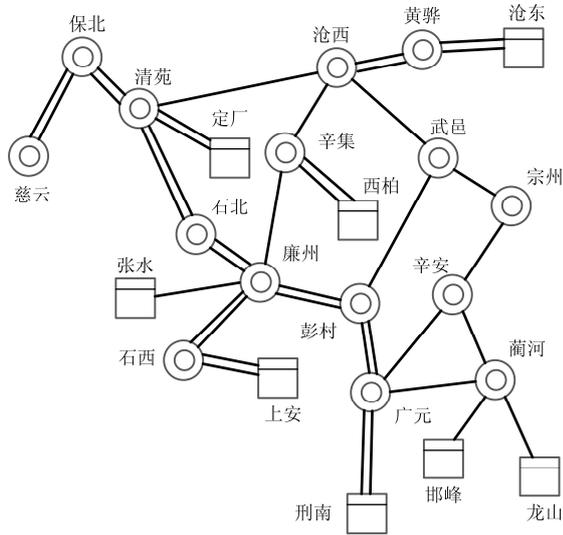


图 5 河北南网 500 kV 节点系统接线图

Fig. 5 Connection diagram of 500 kV nodes in Hebei South network system

廉州 51-石北 51 为双回线路, 若其中一回线路因故障或检修退出运行, 潮流计算之后发现, 另一回线路承担输送功率为 2635.06 MW, 负载率为 101.35%。该线路退出运行直接导致潮流不收敛, 采用本文控制策略调整潮流, 将该线路负载率预期指标定为 85%。经过节点功率调整指标计算之后, 确定西柏坡电厂、辛集、廉州和石北等母线对该线路的调整能力最大, 因此, 需先调整该部分节点功率, 剩余功率由其他节点平衡。与 4.1 节相似, 两种方法对河北南网功率调整效果对比如图 6 所示。

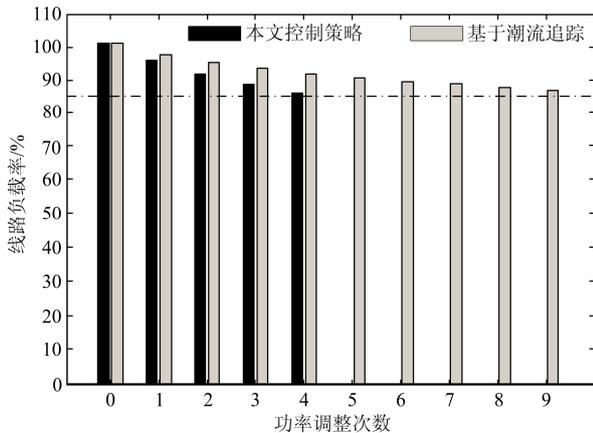


图 6 河北南网功率调整效果对比

Fig. 6 Contrast of power adjustment for the power system in Southern Hebei

从功率调整次数和效率两方面分析, 本文控制策略在第 4 次调整之后, 线路负载率达到了期望值 85%, 其中调整阈值为 3%; 而基于潮流追踪的方法进行功率调整效果不佳, 缓慢接近目标期望值, 第 9 次调整之后, 线路负载率达到有效范围。说明本文控制模型在河北南网实际系统的功率调整过程中同样具有高效性。此外, 根据式(15)得到两种方法的调整性能, 对河北南网功率调整性能对比如图 7 所示。

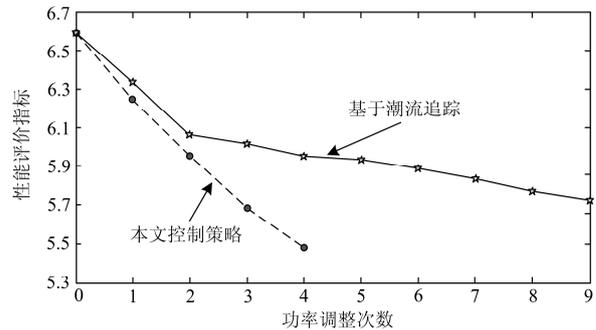


图 7 河北南网系统电网功率调整性能对比

Fig. 7 Contrast of the power grid performance for the power system in Southern Hebei

从图中可以看出, 在第 3 次调整之后, 本文紧急控制模型的性能评价指标已经较明显地低于基于潮流追踪方法得到的指标, 在之后的调整过程中, 一直处于下降趋势, 而基于潮流追踪方法得到的性能评价指标下降速度相对较慢, 第 4 次以后调整效果已经不明显, 直至第 9 次调整结束之后与本文控制模型的第 3 次调整较接近。可见, 在实际电网应用中, 该优化模型在处理线路过负荷紧急控制的调整效果上具有优越性, 性能调整能力高于后者。

5 结论

本文提出一种利用功率灵敏度和潮流熵的紧急控制策略, 能够正确和高效地处理线路过负荷问题, 物理意义明确, 便于实时操作。利用模糊多属性决策法求取灵敏度、潮流熵和自身调整能力的权重影响因子, 并定义节点调整综合指标, 能够将决策专家的定性分析与定量分析相结合。紧急控制优化模型利用分层筛选法获取功率调整节点集和功率平衡节点集, 能够对系统功率进行多轮次调整, 其中, 在使接近过负荷状态的线路达到安全运行水平的同时, 兼顾了系统总体运行水平, 以便降低系统发生更大范围故障的风险, 更具有全面性。最后, 在 IEEE39 节点系统标准算例与河北南网实际系统中验证了该方法的有效性, 对电力系统安全控制具有重要意义。

参考文献

- [1] 肖雅元, 张磊, 罗毅, 等. 基于回路可靠性贡献指标的电网薄弱点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 54-59.
XIAO Yayuan, ZHANG Lei, LUO Yi, et al. Grid weak point analysis based on loop contribution index of the reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 54-59.
- [2] 蔡晔, 曹一家, 谭玉东, 等. 基于标准化结构熵的电网结构对连锁故障的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 36-43.
CAI Ye, CAO Yijia, TAN Yudong, et al. Influences of power grid structure on cascading failure based on standard structure entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 36-43.
- [3] 赵娟, 申旭辉, 吴丽华, 等. 结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 97-101.
ZHAO Juan, SHEN Xuhui, WU Lihua, et al. Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid cross-section with DC power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 97-101.
- [4] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121.
LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [5] ANDERSSON G, DONALEK P, FARMER R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [6] MCCALLEY J, KHAITAN S. Operational defense of power system cascading outages (project S-26)[R]. Wisconsin, America: Wisconsin University, 2008.
- [7] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于广域同步测量系统的预防连锁跳闸控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 32-38.
XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. Study on wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 32-38.
- [8] 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.
SONG Honglei, WU Junyong, WU Linfeng. Dynamic partitioning and active-split strategy in power system emergency control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 224-230.
- [9] 顾卓远, 汤涌, 张健, 等. 基于相对动能的电力系统暂态稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1095-1102.
GU Zhuoyuan, TANG Yong, ZHANG Jian, et al. Real-time power system transient stability emergency control scheme based on the relative kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1095-1102.
- [10] 张瑞琪, 闵勇, 侯凯元. 电力系统切机/切负荷紧急控制方案的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 6-12.
ZHANG Ruiqi, MIN Yong, HOU Kaiyuan. A new method for generation shedding and load shedding in power system emergency control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 6-12.
- [11] 任建文, 李莎, 严敏敏, 等. 基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 392-397.
REN Jianwen, LI Sha, YAN Minmin, et al. Emergency control strategy for line overload based on power flow tracing algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 392-397.
- [12] 任伟, 房大中, 陈家荣, 等. 基于最优控制原理的电力系统紧急控制及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 8-13.
REN Wei, FANG Dazhong, CHEN Jiarong, et al. Optimal control theory based power system emergency control and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 8-13.
- [13] 代飞, 崔挺, 徐箭, 等. 基于综合灵敏度分析的电压校正控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 15-20.
DAI Fei, CUI Ting, XU Jian, et al. Voltage correction control based on comprehensive sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 15-20.
- [14] 徐珊, 刘文颖, 唐哲, 等. 基于功率缺额灵敏度分析的切负荷算法[J]. 中国电力, 2009, 42(2): 9-12.
XU Shan, LIU Wenying, TANG Zhe, et al. A load shedding method based on the power vacancy sensitivity analysis[J]. Electric Power, 2009, 42(2): 9-12.
- [15] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 46-49.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 46-49.
- [16] PEREIRA R M M, FERREIRA C M M, BARBOSA F P

- M. Influence of load shedding in the voltage stability of an electric power system using trajectory sensitivity analysis[C] // Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International: IEEE, 2010: 1-6.
- [17] 徐岩, 郅静. 基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 60-72.
XU Yan, ZHI Jing. A zone-divided emergency control strategy for overload lines based on power sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 60-72.
- [18] 李勇, 刘俊勇, 刘晓宇, 等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 40-46.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 40-46.
- [19] 简祯富. 决策分析与管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [20] 元继学, 王未今. 模糊多属性群决策一致性分析研究[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(1): 126-130.
YUAN Jixue, WANG Weijin. A study of consensus analysis in fuzzy multi-attribute group decision making[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(1): 126-130.
- [21] 王涛, 张尚, 顾雪平, 等. 电力系统运行状态的趋势辨识[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 171-180.
WANG Tao, ZHANG Shang, GU Xueping, et al. Trends identification of power system operating states[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 171-180.
- [22] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.
- [23] 姚峰, 张保会, 周德才, 等. 输电断面安全性保护及其快速算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 31-36.
YAO Feng, ZHANG Baohui, ZHOU Decai, et al. Active power security protection of transmission section and its fast algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 31-36.
- [24] 王涛, 岳贤龙, 顾雪平, 等. 基于奇异值熵和潮流分布熵的电网关键节点辨识[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 46-53.
WANG Tao, YUE Xianlong, GU Xueping, et al. Power grid critical node identification based on singular value entropy and power flow distribution entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 46-53.
- [25] ZIMMERMAN R, MURILLO-SANCHEZ C, GAN D. MATPOWER 4.0[EB/OL]. Ithaca, NY: Cornell University, 2011. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>.

收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-07-30

作者简介:

岳贤龙(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、电力物流管理; E-mail: yue15230237661@163.com

王涛(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制, 智能技术在电力系统中的应用; E-mail: wtwxx@126.com

顾雪平(1964—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电力系统安全防御和系统恢复、电力系统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的应用。E-mail: xpgu@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)