

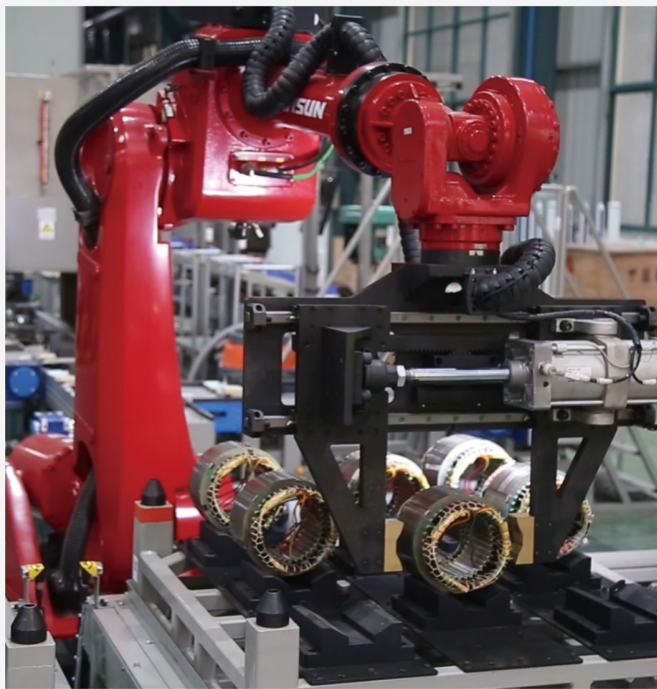
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

赵开联,唐岚,杨婧,濮永现,耿槩,王成磊,赵开伟.
基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载
紧急控制策略.
电机与控制应用,2021,48(11):104.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所(集团)有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载紧急控制策略^{*}

赵开联¹, 唐 岚¹, 杨 婧¹, 濮永现¹, 耿 樾¹, 王成磊¹, 赵开伟²

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650000;

2. 黑龙江中医药大学 医学信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

摘 要: 为快速消除线路过载避免发生连锁故障, 提出一种基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载紧急控制策略。首先用潮流追踪法确定控制节点组, 并结合发电机的调节速率计算出控制节点组的调整量。然后用功率灵敏度法判断控制节点组的功率调整方向。最后采用反向等量调整法对控制节点组进行相应的控制, 通过 IEEE39、IEEE118 节点系统验证了潮流追踪和功率灵敏度组合方法的优越性和有效性。

关键词: 线路过载; 潮流追踪; 功率灵敏度; 反向等量配对

中图分类号: TM 732 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)11-0104-10

doi: 10.12177/emca.2021.114

Overload Emergency Control Strategy for Line Based on Power Flow Tracing and Power Sensitivity^{*}

ZHAO Kailian¹, TANG Lan¹, YANG Jing¹, PU Yongxian¹, GENG Yue¹,
WANG Chenglei¹, ZHAO Kaiwei²

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650000, China;

2. College of Medical Information Engineering, Heilongjiang University of Traditional
Chinese Medicine, Harbin 150000, China)

Abstract: In order to eliminate line overload quickly and avoid chain failures, an emergency control strategy for line overload based on power flow tracing and power sensitivity is proposed. Firstly, the power flow tracing method is used to determine the control node group, and the adjustment amount of the control node group is calculated based on the adjustment rate of the generator. Then, the power sensitivity method is used to judge the power adjustment direction of the control node group. Finally, the corresponding control of the control node group is carried out by the reverse equal adjustment method. The superiority and effectiveness of the combined method of power flow tracing and power sensitivity are verified by IEEE39 and IEEE118 node systems.

Key words: line overload; power flow tracing; power sensitivity; reverse equivalence pairing

0 引 言

电力系统输电线路因发生故障被切除时会引

起潮流转移, 易导致其他线路过载, 从而引起一系列的连锁跳闸事故, 最终导致大停电^[1-2]。为防止连锁事故的发生, 运行人员需要在短时间内采取

收稿日期: 2021-07-06; 收到修改稿日期: 2021-10-15

^{*} 基金项目: 云南省重大科技专项计划项目(202002AF080001)

作者简介: 赵开联(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

唐 岚(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、控制与智能电网。

相应的紧急控制策略来消除线路过载,保证系统的安全运行^[3]。

目前解决线路过载的紧急控制方法有:数学规划法^[4-8]、灵敏度法^[9-12]和潮流追踪法^[13-15]。数学规划法把消除过载线路看成一个最优化问题,通过各节点对线路过载的控制情况及系统各线路的约束构造优化模型,利用规划的方法求解该模型,但在求解过程中调整设备较多且计算量复杂,还可能存在着多解或者计算不收敛等问题。灵敏度法通常有两种:(1)传统的灵敏度法在计算灵敏度时大多采用直流潮流法,平衡机没有参与调节;(2)灵敏度法以电流相关系数矩阵为基础推导出支路-节点功率灵敏度,利用支路-节点功率灵敏度和反向调整法得到一种解决线路过载紧急控制方法^[11]。但这两种灵敏度法在计算灵敏度时与电网拓扑结构和网络参数关系较大,与电网的实际运行参数关系较小,会带来较大的计算误差。潮流追踪法主要分析发电机出力在输电线路及负荷间的有功分布关系^[16]。通过调节对线路占用率较大发电机节点、负荷节点来消除线路过载。但潮流追踪法无法判断调整节点组的功率调整方向。以上三种方法均未考虑发电机有功调节速率问题,在实际运行中受发电机调节速率的约束,特别是当遇到严重过负荷时,发电机的出力可能难以及时调整到位^[17]。文献[17]在支路-节点功率灵敏度方法的基础上考虑了发电机调节速率,提出了一种防止输电线路连锁过载的自适应紧急控制策略。但得出的控制节点组不一定是对过载线路影响较大的节点且在计算功率调整量时计算复杂。

消除线路过载不仅要确定控制节点组还要判断控制节点组的功率调整方向,而以上方法均未完全考虑。针对以上方法的不足,本文结合了功率灵敏度法和潮流追踪法的优点,提出了一种基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载紧急控制策略。该方法用潮流追踪法确定出对过载线路影响较大的发电机节点和负荷节点。同时为了避免切负荷,潮流追踪法还能提供从负荷向发电机的功率分摊信息,确定出控制节点组。简化支路-节点功率灵敏度的求解,进一步提高了控制速度,采用支路-节点功率灵敏度法判断控制节点组的功率调整方向,解决了潮流追踪法功率调整方向不确定的问题。结合发电机的调节速率计算出控制节

点组的调整量,采用反向等量配对原则对控制节点组进行控制,使其更贴近现实运行。

1 消除线路过载的组合方法

消除线路过载一般分为三步:(1)确定控制节点组;(2)判断控制节点组的功率调整方向;(3)计算控制节点组的调整量。

1.1 确定控制节点组

用灵敏度法计算功率灵敏度时主要与电网的拓扑结构和参数有关,电网的实际运行参数对其影响较小。但过载线路的潮流分布不仅与电网拓扑结构有关而且与电网实际运行也有关。通过灵敏度法确定的控制节点组不一定是效果最好的,因此本文采用潮流追踪法确定控制节点组。

潮流追踪即是对系统中的某一个特定的运行状态,通过分析和计算,找到网络中的功率分配关系,明确某个特定发电机的功率都送给了哪些负荷,某个特定负荷节点的功率来源于哪些发电机^[18]。潮流追踪是基于比例分配原则进行的,比例分配的原理是^[19]:定义 P 为节点的流功率,等于节点的总流进功率,也等于节点的总流出功率,如图 1 所示。比例分配原则定义流入功率 P_a 、 P_b 在流出功率 P_c 、 P_d 中所占的份额分别为^[14]

$$P_{ac} = \frac{P_a}{P} P_c, P_{ad} = \frac{P_a}{P} P_d, P_{bc} = \frac{P_b}{P} P_c, P_{bd} = \frac{P_b}{P} P_d$$

在潮流追踪前,需要将系统化为无损网络,将过载线路当作潮流追踪的目标线路,分别向发电机节点和负荷节点进行追踪,得到向该目标线路提供功率的发电机节点的集合和从该目标支路汲取功率的负荷节点的集合^[13]。

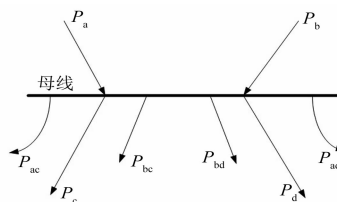


图1 比例分配原则

1.1.1 找出对过载线路有影响的节点

通过潮流追踪得到待调整的发电机节点和负

荷节点的集合:

$$G_l = \{G_{l,1}, G_{l,2}, \dots, G_{l,m}\} \quad (1)$$

$$L_l = \{L_{l,1}, L_{l,2}, \dots, L_{l,n}\} \quad (2)$$

式中: G_l 为向支路 l 提供功率的发电机节点的集合; m 为向支路 l 提供功率的发电机节点的个数; L_l 为从支路 l 汲取功率的负荷节点的集合; n 为相应的负荷节点个数。

通过潮流追踪可以得到的 G_l 和 L_l 中各个节点对支路 l 的潮流贡献分别为

$$P_{l-G} = \{P_{l,G1}, P_{l,G2} \dots P_{l,Gi} \dots P_{l,Gm}\} \quad (3)$$

$$P_{l-L} = \{P_{l,L1}, P_{l,L2} \dots P_{l,Li} \dots P_{l,Ln}\} \quad (4)$$

在实际电力系统中, 消除某一线路过载需要调整 G_l 和 L_l 中发电机节点和负荷节点, 通常情况下只调节对过载线路贡献较大的发电机节点和负荷节点, 不需要全部调节, 因此需要找出对过载线路影响较大的节点进行调整。

1.1.2 确定对过载线路影响较大的节点

本文在控制过程中引入了文献[14]占用率的概念, 只需调整占用率较大的发电机节点和负荷节点。

发电机 G 对线路 l 的占用率 $\alpha_{G,l}$ 定义为发电机 G 提供给线路 l 的功率与该线路 l 上总功率的比值, 占用率 $\alpha_{G,l}$ 的表达式为

$$\alpha_{G,l} = \frac{P_{l,Gi}}{P_l} \quad (5)$$

同理可计算出负荷 L 对线路 l 的占用率 $\beta_{L,l}$:

$$\beta_{L,l} = \frac{P_{l,Li}}{P_l} \quad (6)$$

为了避免切负荷找到给负荷节点提供功率的发电机节点, 以负荷节点集合 L_l 为目标节点采用潮流追踪法得到对该目标节点提供功率的发电机节点集合 G'_l 。

$$G'_l = \{G'_{l,1}, G'_{l,2}, \dots, G'_{l,m}\} \quad (7)$$

在 G_l 和 G'_l 中选出占用率较大的发电机节点集合作为合适控制节点组 $G^*(G^+G^-)$, 并用功率灵敏度判断控制节点组的功率调整方向。

潮流追踪法的优点是可以清楚地知道每台发电机出力对电网输电线路及负荷功率的贡献值, 用潮流追踪法可以准确地得到对过载线路有影响的节点, 但这些节点有可能与过载线路的功率变化呈负相关性, 即减少该节点的出力会导致过载线路功率的增加, 因此用潮流追踪法无法判断控制节点

组的功率调整方向。支路-节点功率灵敏度法可以将对过载线路有影响的节点分为两类: (1) 与过载线路有功变化呈正相关性的节点; (2) 与过载线路有功变化呈负相关性的节点, 用支路-节点功率灵敏度法判断控制节点组功率调整的方向。

1.2 判断控制节点组的功率调整方向

因为传统的灵敏度法采取紧急措施消除线路过载时, 平衡机未参与调节, 无法得到最优控制方案, 所以本文采用文献[11]中的支路-节点功率灵敏度法。

文献[11]中的支路-节点功率灵敏度法以电流相关系数矩阵为基础, 根据广域测量系统实时提供的电网拓扑结构和节点电压数据, 推导出节点注入功率变量与线路功率变量之间的功率灵敏度矩阵^[11]。根据该方法得到电网中节点 N_i 对线路 B_K 的灵敏度 S_{K-i} 为

$$S_{K-i} = \frac{\lambda_{K-i} U_{K-B}}{U_{i-N}} (\cos \phi_{K,B} \cos \phi_{i,N} + \sin \phi_{K,B} \sin \phi_{i,N}) \quad (8)$$

式中: U_{K-B} 和 ϕ_{K-B} 分别为线路 B_K 的首端电压模值和相角; U_{i-N} 和 ϕ_{i-N} 分别为节点 N_i 的电压模值和相角; λ_{K-i} 为线路 B_K 的电流相量与节点 N_i 的注入电流相量之间的电流相关系数。

λ_{K-i} 系数可以通过式(9)得到:

$$C(\lambda) = Y_B A^T Y_N^{-1} \quad (9)$$

其中, 对于一个含有 n 个节点、 b 条输电线路的电网, $C(\lambda)$ 为电网相关度系数矩阵, 是一个 $b \times n$ 阶的实数矩阵; Y_B 为支路电纳矩阵; A 为节点关联矩阵; Y_N 为节点电纳矩阵。

根据三角恒等变换公式可以将式(8)转化为

$$S_{K-i} = \frac{\lambda_{K-i} U_{K-B}}{U_{i-N}} [\cos(\phi_{K,B} - \phi_{i,N})] \quad (10)$$

在电力系统潮流计算中各节点电压幅值和相角相差不大, 因此 $\frac{U_{K-B}}{U_{i-N}}$ 是一个接近于 1 的值, $\cos(\phi_{K,B} - \phi_{i,N})$ 也是一个接近于 1 的值, 这两个值相乘接近于 1 对结果影响不大, 因此可将式(10)近似等效为

$$S'_{K-i} = \lambda_{K-i} \quad (11)$$

从式(11)可知, 简化了计算量提高了计算速度, 为快速消除线路过载提供了保障。

根据式(11)可以得到: $S'_{k-i} > 0$ 表示该节点的发电机出力减少或负荷功率增加时可以降低过载线路的功率; $S'_{k-i} < 0$ 表示该节点的发电机出力增加或负荷功率减少时可以增加过载线路的功率。因此, 可以将系统中的节点分为两类: (1) 为减出力节点或增负荷节点, 用集合 D_1 表示; (2) 增出力节点或切负荷节点, 用集合 D_2 表示。控制节点组 $G'(G^+G^-)$ 中 G^+ 为增出力节点, G^- 减出力节点。

1.3 计算控制节点组的调整量

系统出现过载后, 确定控制节点组 $G'(G^+G^-)$, 依据线路的过载比例和对线路占用率的大小, 并结合发电机调节速率分别按比例增出力 and 减出力, 从而消除过载线路上的越限功率。

为消除过载线路上越限部分的功率, 发电机所调整的功率量记为 ΔP_G , 则发电机 G_i 功率调整为

$$\Delta P_{G_i} = \alpha_{G_i, l} \cdot \Delta P_l \cdot P_{G_i} / P_l \quad (12)$$

式中: $\alpha_{G_i, l}$ 为发电机 G_i 的占用率; ΔP_l 为过载支路的越限的功率; P_{G_i} 为所调整的发电机的功率; P_l 为过载线路上的功率。

总调整量 ΔP_G 为

$$\Delta P_G = \sum_{G_i \in G_l} \Delta P_{G_i} \quad (13)$$

根据各个发电机的调节速率和紧急控制时限, 计算出控制节点组 $G'(G^+G^-)$ 的最大调节能力。

$$\Delta P_{Ga} = \theta \times t \quad (14)$$

式中: θ 为发电机调节速率; t 为紧急控制时间。

根据反向等量配对调整法, 每个控制节点组中增出力节点 i 的调整量和减出力节点 j 的调整量应该相等, 则控制节点组 i 和 j 实际调节点值为

$$\begin{cases} \Delta P_i = \min(\Delta P_{G_i}, \Delta P_{G_{ai}}) \\ \Delta P_j = \min(\Delta P_{G_j}, \Delta P_{G_{aj}}) \\ \Delta P_i = \Delta P_j \end{cases} \quad (15)$$

2 消除过载的紧急控制流程

当线路处于过载时, 为保护其他输电线路的安全, 需要在短时间内采取紧急控制策略消除线路过载使系统恢复至安全状态。紧急控制流程图如图2所示。

紧急控制步骤如下:

- (1) 计算紧急状态时线路的潮流。
- (2) 寻找过载线路。

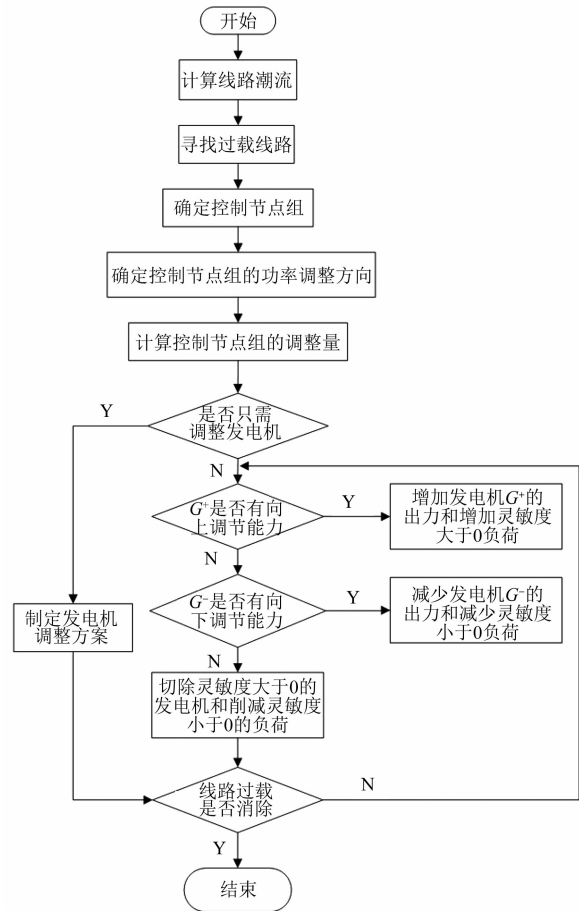


图2 紧急控制流程图

(3) 确定出控制节点组。

(4) 计算各节点对过载线路的功率灵敏度, 确定控制节点组的功率调整方向。

(5) 结合发电机调整速率计算控制节点组的调整量。

(6) 能否通过只调节发电机出力而消除线路过载。若是, 制定发电机调整方案; 若不是继续下一步。

(7) 发电机集合 G^+ 是否有向上调节能力。若是, 则增加发电机 G^+ 的出力和增加 $S'_{k-i} > 0$ 的负荷功率; 若不是继续下一步。

(8) 发电机集合 G^- 是否有向下调节能力。若是, 则减少发电机 G^- 的出力和削减 $S'_{k-i} < 0$ 的负荷功率; 若不是继续下一步。

(9) 切除 $S'_{k-i} > 0$ 的发电机和削减 $S'_{k-i} < 0$ 的负荷。

(10) 线路过载是否消除, 若是, 可结束计算; 若不是, 转到步骤(6)。

3 算例分析

为验证潮流追踪和功率灵敏度组合方法的优越性和有效性,本文利用 MATLAB 软件对 IEEE39 和 IEEE118 节点系统进行仿真计算。

3.1 算例一

在 IEEE39 节点系统中,线路 6-11 因故障断开造成 14-4、10-13、13-14 这三条线路过载,过载线路功率如表 1 所示。IEEE39 节点系统图如图 3 所示。

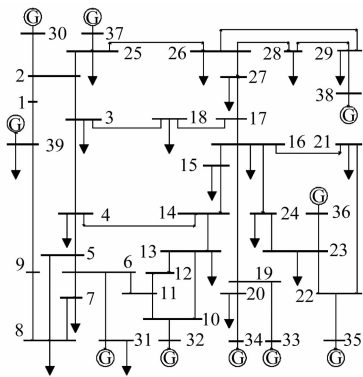


图 3 IEEE39 节点系统图

表 1 IEEE39 系统发生故障线路过载情况

过载线路	正常功率/ MW	故障功率/ MW	最大传输 功率/MW	过载率
14-4	265.42	528.16	500	1.056
10-13	322.10	617.40	600	1.029
13-14	317.18	639.88	600	1.066

下文中,方法 1 为潮流追踪法;方法 2 为支路-节点功率灵敏度法;方法 3 为潮流追踪和功率灵敏度组合方法。验证潮流追踪和功率灵敏度组合方法的优越性。

以这三条线路为目标线路采用两种方法确定出对过载线路影响较大的发电机节点和负荷节点,如表 2 所示。

表 2 两种方法确定的节点

过载线路	发电机节点		负荷节点	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
14-4	32	32	4	12
10-13	32	32	4	12
13-14	32	32	4	12

由表 2 可知用方法 1 和方法 2 确定的发电机节点是相同的均是 32 号节点而确定的负荷节点是不同的,方法 1 是 4 号节点,方法 2 是 12 号节点,这两种方法所确定出的节点不同是因为方法 1 主要与节点的潮流分布有关,方法 2 主要与电网的拓扑结构有关。

采用方法 2 分别用式(8)和简化后的式(11)确定出对过载线路影响较大的发电机节点和负荷节点,如表 3 所示。

表 3 简化前后确定的节点

过载线路	发电机节点		负荷节点	
	简化前	简化后	简化前	简化后
14-4	32	32	12	12
10-13	32	32	12	12
13-14	32	32	12	12

由表 3 可知简化前、后确定的发电机节点和负荷节点均没有发生变化,说明简化后式(11)的正确性。

分别对两种方法确定的发电机节点和负荷节点削减 5 MW,观察三条过载线路的功率变化情况,如表 4 所示。

表 4 削减 5 MW 支路功率变化情况

过载 线路	发电机节 点功率/MW	负荷节点 功率/MW		支路变化/MW	
	32	4	12	方法 1	方法 2
14-4	650	500	8.53	4.12	0.2
10-13	650	500	8.53	4.78	2.5
13-14	650	500	8.53	4.98	0.1

由表 4 可知,对方法 1 和方法 2 确定的发电机节点和负荷节点削减 5 MW,发现削减 32 号和 4 号节点引起的支路功率变化明显要比消减 32 号和 12 号节点引起的支路功率变化要大,则说明方法 2 确定的发电机节点和负荷节点并不是对过载支路影响较大的节点。

以任意两条线路为目标线路用方法 2,得到对该目标线路影响较大的两个发电机节点(两个发电机节点,一个功率灵敏度大于 0;一个功率灵敏度小于 0)分别对这两个发电机削减 100 MW,观察这两条线路的功率变化情况,如表 5 所示。

由表 5 可知,电力系统中的节点可分为两类:第一类功率灵敏度大于 0;第二类功率灵敏度小于 0。如果用方法 1 作为线路过载的紧急控制策略,确定出发电机节点,该节点功率灵敏度小于 0,此时对该发电机节点减出力有可能会加重线路的过载情况。

表 5 削减 100 MW 前后支路功率变化情况					
目标 线路	削减 前功率/ MW	发电机 节点	功率 灵敏度	削减后 功率/ MW	支路变 化/MW
1-39	109.24	30	0.141 1	85.04	减小 24.2
		39	-0.495 5	147.99	增大 38.75
2-3	301.67	30	0.445 1	240.02	减小 61.65
		32	-0.224 2	307.20	增大 5.53

通过算例分析得出:(1)在节点对过载线路的影响方面,潮流追踪法比功率灵敏度法效果更好,所以采用潮流追踪法确定控制节点组。(2)支路-节点功率灵敏度法可以将节点分为两类。一类与过载线路有功变化呈正相关性;另一类与过载线路有功变化呈负相关性。所以采用支路-节点功率灵敏度法判断控制节点组的功率调整方向。

3.2 算例二

验证潮流追踪和功率灵敏度组方法的有效性,分别用三种方法作为紧急控制策略,消除线路过载。以算例一为例,过载线路功率如表 1 所示。为了更贴近实际运行,将紧急控制策略的时间设定为 2 min,对于并网的火力发电机组,通常要求其出力的每分钟调节速度大于最大出力的 5%^[17] IEEE39 节点系统中 10 台发电机有功出力的相关数据如表 6 所示。

表 6 IEEE39 节点系统发电机数据			
发电机节点	最大出力/MW	实时出力/MW	调节能力/MW
30	1 040	250	104.00
31	746	678	74.59
32	725	650	72.50
33	652	632	65.20
34	508	508	50.80
35	687	650	68.70
36	580	560	58.00
37	564	540	56.40
38	865	830	86.50
39	1 100	1 000	110.00

分别用三种方法,确定出控制节点组如表 7~9 所示。

表 7 方法 1 确定的控制节点组				
过载线路	发电机节点	占用率	负荷节点	占用率
14-4	32	1	4	0.852 4
			8	0.147 1
			4	0.710 6
10-13	32	1	15	0.166 4
			8	0.122 6
			4	0.710 6
13-14	32	1	15	0.166 4
			8	0.122 6

表 8 方法 2 确定控制节点组				
过载线路	减出力 节点	功率 灵敏度	增出力 节点	功率 灵敏度
14-4	32	0.519 4	31	-0.275 6
	33	0.193 3	39	-0.194 4
	36	0.192 2	30	-0.080 5
10-13	32	0.907 8	38	-0.010 4
			39	-0.010 2
			37	-0.010 0
13-14	32	0.934 0	38	-0.023 3
			39	-0.022 9
			37	-0.022 3

表 9 方法 3 确定控制节点组					
过载 线路	发电机 节点	功率 灵敏度	负荷 节点	提供功率的 发电机节点	功率 灵敏度
14-4	32	0.519 4	4	32	0.519 4
			8	31	-0.275 6
			4	32	0.907 8
10-13	32	0.907 8	15	33	-0.009 2
			8	31	-0.009 2
			4	32	0.934 0
13-14	32	0.934 0	15	33	-0.020 7
			8	31	-0.020 6

以三条过载线路为目标线路,分别用三种方法确定出控制节点组,由表 7 可知,采用方法 1 选取对过载线路占用率较大的节点,32 号发电机节点和 4 号负荷节点,作为控制节点组;由表 8 可

知,采用方法 2 选取对过载线路功率灵敏度较大的节点,32 号减出力节点和 39 号增出力节点,作为控制节点组;由表 9 可知,采用方法 3 首先选取对过载线路占用率较大的 32 号发电机节点和 4、15、8 负荷节点,然后根据给负荷提供功率的 31、32、33 号发电机节点选出对三条过载线路均有影响的 31 号发电机,最后将 32 号发电机节点和 31 号发电机节点作为控制节点组,并用功率灵敏度来判断功率调整的方向。

分别用三种方法计算出控制节点组的功率调整量,三种方法的紧急控制策略如表 10 所示。

表 10 三种方法的紧急控制策略

过载 线路	控制节点组	调整量/ MW	调节能力/ MW	调整后 功率/MW
14-4	方法 1 32-4	40.51	72.5	494.68
	方法 2 32-39	52.80	72.5	491.10
	方法 3 32-31	40.51	72.5	495.51
10-13	方法 1 32-4	40.51	72.5	566.93
	方法 2 32-39	52.80	72.5	578.67
	方法 3 32-31	40.51	72.5	578.68
13-14	方法 1 32-4	40.51	72.5	587.32
	方法 2 32-39	52.80	72.5	599.56
	方法 3 32-31	40.51	72.5	599.55

由表 10 可知,三种方法均可消除线路过载。方法 3 与方法 1 的调整量相同,控制节点组不同,方法 1 需要削减 4 号负荷节点 40.51 MW,方法 3 不需要削减负荷避免了切负荷;方法 3 与方法 2 的控制节点组和调整量均不同,方法 2 的调整量为 52.8 MW,方法 3 调整量为 40.51 MW,方法 3 的调整量要比方法 2 的调整量少。

算例二验证了潮流追踪和功率灵敏度组合方法的有效性,与方法 1 相比,方法 3 避免了切负荷;与方法 2 相比,该方法得到的功率调整量要小,则说明该方法确定的控制节点组比方法 2 确定的控制节点组效果好。若紧急控制策略的时间设定为 1 min,采用文献[17]中的方法需要切除 32 号发电机和削减 15 号负荷节点 320 MW,削减 16 号负荷节点 50 MW 才能消除线路过载。采用本文方法只需要切除 32 号发电机和削减 12 号负荷节点 370 MW,就可以消除过载,本文方法只对一个负荷进行了调整。

3.3 算例三

为进一步验证潮流追踪和功率灵敏度组合方法的有效性,对 IEEE118 节点系统进行仿真分析,IEEE118 节点系统图如图 4 所示,发电机有功出力相关参数如附表 1 所示。

在 IEEE118 节点系统中,线路 103-110 因故障断开,导致 103-105 和 105-108 这两条线路过载,过载线路功率如表 11 所示。

表 11 IEEE118 系统发生故障线路过载情况

过载线路	正常功率/ MW	故障功率/ MW	最大传输 功率/MW	过载率
103-105	32.45	68.67	60	1.144 6
105-108	23.97	88.10	80	1.101 2

分别用三种方法确定出控制节点组如表 12~14 所示。

表 12 方法 1 确定的控制节点组

过载 线路	发电机 节点	占用率	负荷 节点	占用率
103-105	100	0.588 9	112	0.344 7
	103	0.294 3	105	0.214 7
	89	0.116 7	110	0.193 6
105-108			107	0.175 2
	100	0.662 3	112	0.565 1
	103	0.206 4	110	0.317 3
	89	0.131 3	109	0.094 3

表 13 方法 2 确定的控制节点组

过载 线路	减出力 节点	功率 灵敏度	增出力 节点	功率 灵敏度
103-105			105	-0.316 9
	103	0.087 4	111	-0.314 3
			110	-0.313 8
105-108			110	-1.036 8
	103	0.015 8	111	-1.035 1
			112	-1.025 6

以两条过载线路为为目标线路,分别用三种方法确定出控制节点组,由表 12 可知,采用方法 1 选取对过载线路占用率较大的节点,100 号发电机节点和 112 号负荷节点,作为控制节点组;由表

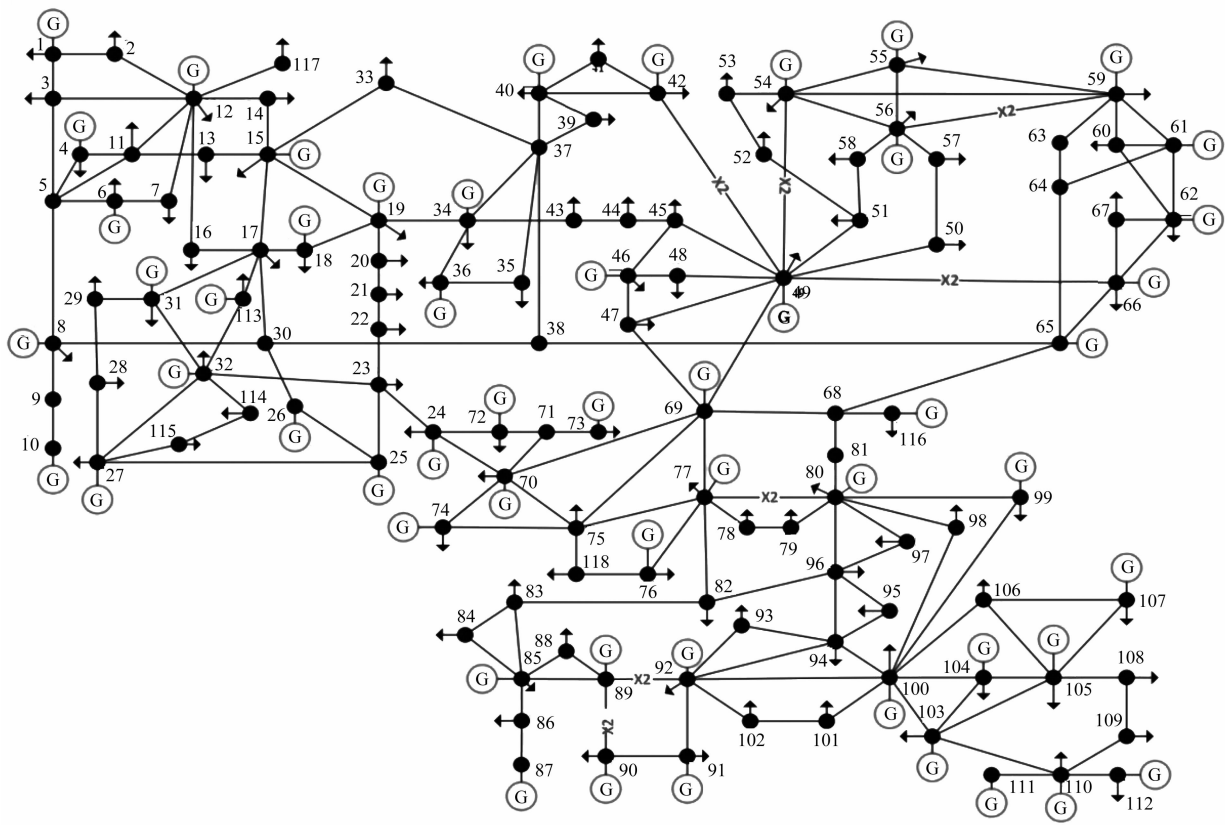


图4 IEEE118 节点系统图

表 14 方法 3 确定的控制节点组

过载 线路	发电机 节点	功率 灵敏度	负荷 节点	提供功率的 发电机节点	功率 灵敏度
			112	100	0.010 3
103-105	100	0.010 3	105	103	0.087 4
			110	111	-0.314 3
			112	111	-1.035 1
105-108	100	0.010 5	110	111	-1.035 1
			109	103	0.015 8

13 可知,采用方法 2 选取对过载线路功率灵敏度较大的节点,103 号减出力节点和 110 号增出力节点,作为控制节点组;由表 14 可知,采用方法 3 首先选取对过载线路占用率较大的 100 号发电机节点和 105、109、110、112 号负荷节点,然后根据给负荷提供功率的 100、103、111 号发电机节点选出对两条过载线路均有影响的 111 号发电机,最后将 100 号发电机节点和 111 号发电机节点作为控制节点组,并用功率灵敏度来判断功率调整的方向。

分别用三种方法计算出控制节点组的功率调整量,三种方法的紧急控制策略如表 15 所示。

表 15 三种方法的紧急控制策略

过载线路	调整节点组		调整量/	调整后功率/
			MW	MW
103-105	方法 1	100-112	25.40	59.85
	方法 2	103-110	29.05	56.01
	方法 3	100-111	26.70	59.92
105-108	方法 1	100-112	25.40	58.82
	方法 2	103-110	29.05	55.81
	方法 3	100-111	26.70	59.04

由表 15 可知,三种方法均可消除线路过载。方法 3 与方法 1 相比避免了切负荷;方法 3 比方法 2 的调整量要少。

算例三进一步验证了潮流追踪和功率灵敏度组合方法的有效性,说明该方法不仅在小系统中成立,在大系统中也成立。若将紧急控制策略的时间设定为 1 min,受 100 号发电机调节速率的影

响,无法在规定的时间内使系统恢复到安全状态之内,需采取切机操作以保证系统的安全稳定运行。切除 100 号发电机可以快速改变两条过载线路的潮流,而切机将造成 252 MW 的出力损失,为保证系统中的有功平衡,需在 1 min 内增加其他发电机组有功出力 206.5 MW,切除 112 号负荷节点 45.5 MW。

4 结 语

本文结合了潮流追踪法和功率灵敏度法的优点,提出了一种基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载紧急控制策略。该方法主要有以下特点:

- (1) 用潮流追踪法确定的控制节点组比功率灵敏度法确定的控制节点组效果好;
- (2) 用功率灵敏度法判断控制节点组的功率调整方向,解决了潮流追踪法功率调整方向不确定的问题;
- (3) 考虑了发电机的调节速率并简化了功率灵敏度的求解,减少了计算量提高了紧急控制速度,使该紧急控制策略更加贴近实际运行。

【参考文献】

- [1] 杨文辉,毕天姝,马强,等. 基于广域电压相角信息的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(24):58.
- [2] 任建文,魏俊姣,谷雨峰. 基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):53.
- [3] 石立宝,史中英,姚良忠,等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术,2010,34(3):48.
- [4] 赵渊,周家启,刘洋,等. 发输电组合系统可靠性评估中的最优负荷削减模型分析[J]. 电网技术,2004,28(10):34.
- [5] 程临燕,郝治国,张保会,等. 基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):51.
- [6] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法[J]. 电网技术,2005,29(5):25.
- [7] DANIELS H, CHEN M. An optimization technique and security calculations for dispatching computers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(3):883.
- [8] KALTENBACH J C, HAJDU L P. Optimal corrective rescheduling for power system security[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, PAS-90(2):843.
- [9] 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.
- [10] 邓佑满,黎辉,张伯明,等. 电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J]. 电力系统自动化,1999,23(18):5.
- [11] 徐岩,鄧静. 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.
- [12] 徐岩,鄧静,樊世通. 基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):118.
- [13] 牛瑞馨. 基于潮流追踪的风险评估负荷削减模型研究[D]. 天津:天津大学,2011.
- [14] 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.
- [15] BIALEK J. Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access[J]. IEEE Transactions on Power System,1997,12(3):1185.
- [16] 刘芳冰. 复杂电网跨区跨省通道输电能力的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [17] 徐劭翔. 互联电网输电能力计算及紧急控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
- [18] 李卫东,魏立明,孙辉,等. 潮流追踪算法比较研究[J]. 大连理工大学学报,2002,42(4):491.
- [19] 刘福斌,李扬,陈珩. 电力市场中按比例分配原则的证明及其推广[J]. 电网技术,2001,25(5):25.

附表 1 IEEE118 节点系统发电机数据

发电机节点	1	4	6	8	10	12	15	18	19	24
实时出力/MW	0	0	0	0	450	85	0	0	0	0
最大出力/MW	100	100	100	100	550	185	100	100	100	100
调节能力/MW	5.00	5.00	5.00	5.00	27.5	9.25	5.00	5.00	5.00	5.00
发电机节点	25	26	27	31	32	34	36	40	42	46
实时出力/MW	220	314	0	7	0	0	0	0	0	19
最大出力/MW	320	414	100	107	100	100	100	100	100	119
调节能力/MW	16	20.7	5.00	5.35	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.95
发电机节点	49	54	55	56	59	61	62	65	66	69
实时出力/MW	204	48	0	0	155	160	0	391	392	521
最大出力/MW	304	148	100	100	255	260	100	491	492	805.2
调节能力/MW	15.20	7.40	5.00	5.00	12.75	13.00	5.00	24.55	24.6	40.26
发电机节点	70	72	73	74	76	77	80	85	87	89
实时出力/MW	0	0	0	0	0	0	477	0	4	607
最大出力/MW	100	100	100	100	100	100	577	100	104	707
调节能力/MW	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	28.85	5.00	5.20	35.35
发电机节点	90	91	92	99	100	103	104	105	107	110
实时出力/MW	0	0	0	0	252	40	0	0	0	0
最大出力/MW	100	100	100	100	352	140	100	100	100	100
调节能力/MW	5.00	5.00	5.00	5.00	17.60	7.00	5.00	5.00	5.00	5.00
发电机节点	111	112	113	116						
实时出力/MW	36	0	0	0						
最大出力/MW	136	100	100	100						
调节能力/MW	6.8	5.00	5.00	5.00						

(上接第 71 页)

[4] 白新雷,白佳航,冯剑,等. 移动式无线供电系统电
磁耦合机构研究[J]. 河北电力技术,2020(3): 5.

[5] 刘言伟,卢闻州,董一帆,等. 电动汽车无线充电用
方形线圈仿真优化研究[J]. 电源学报,2020,18
(2): 184.

[6] 孙凯东. 电动汽车无线充电 DD 型线圈设计参数优
化[J]. 科技创新导报,2019(28): 113.

[7] 刘志珍,曾浩,陈红星,等. 电动汽车无线充电系统
磁芯结构的设计及优化[J]. 电机与控制学报,
2018,22(1): 8.

[8] LI S, MI C C. Wireless power transfer for electric
vehicle applications[J]. IEEE Journal of Emerging
and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 3
(1): 4.

[9] 孙英,苑子鹏,宫飞翔,等. 无线充电线圈空间位置
对传输效率的影响[J]. 电源技术,2020,44(9):
1375.

[10] 曾玉凤,丘东元,张波. 磁谐振无线电能传输系统线
圈设计综述[J]. 电源学报,2019,17(4): 94.

[11] 邓亚峰. 无线供电技术[M]. 北京:冶金工业出版
社,2013.

[12] 刘志珍,曾浩,陈红星,等. 电动汽车无线充电系统
磁芯结构的设计及优化[J]. 电机与控制学报,
2018,22(1): 8.

[13] 周丽波,梁迪飞,李维佳,等. 无线充电用磁屏蔽材
料[J]. 磁性材料及器件,2019,50(6): 57.

[14] 徐桂芝,李晨曦,赵军,等. 电动汽车无线充电电磁
环境安全性研究[J]. 电工技术学报,2017,32
(22): 152.

[15] 李志刚. 涡流探伤法在凝汽器管腐蚀泄漏检查中
的应用[J]. 热力发电,1991(3): 1.