

考虑平衡机参与的防连锁过载跳闸策略

为消除因潮流转移导致的线路连锁过载,提出一种考虑平衡机参与的防连锁过载跳闸策略,分析了发电转移分布因子(GSDF)的特点及其物理意义,指出了平衡机参与紧急控制时控制节点选择方法及灵敏度确定方法,利用反向等量调整法并考虑正常线路冗余量约束计算功率调整量,有效避免了潮流校验,提高了紧急控制速度。通过IEEE39节点系统仿真证明,将平衡机参与紧急控制,在调整时间、调整节点数量以及总功率调整量上有显著优势。

徐 岩 郅 静/新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)



徐 岩/副教授

电网中某些线路因故障断开会引起潮流转移,极易导致其他线路过载,引起过负荷后备保护动作切除线路,导致连锁跳闸,甚至大停电事故^[1]。为避免潮流转移引起线路连锁过载跳闸,在故障线路断开后,利用潮流转移路径搜索算法^[2-3]快速确定受潮流转移影响严重且存在过载风险的线路,对这些线路进行重点监测,一旦发生过载则快速闭锁其过负荷后备保护,并采取相应的紧急控制措施快速消除过载。

以往多数方法^[4-9]中,采取紧急控制措施,消除线路过载时,平衡机都不参与调节,这极易导致无法得到最优控制方案。例如,某线路过载,电网中对该线路有最佳减载调节效果的发电机是平衡机,但由于在求取控制方案时不考虑平衡机,因而无法得到最优控制方案。

本文提出一种考虑平衡机参与的防连锁过载跳闸策略,分析了发电转移分布因子(Generation Shift Distribution

Factor, GSDF)的特点及其物理意义,指出了平衡机参与紧急控制时控制节点选择方法及灵敏度确定方法,利用反向等量调整法,并考虑正常线路冗余量约束计算功率调整量,有效避免了潮流校验,提高了紧急控制速度。通过IEEE 39节点系统对该方法进行了验证。

GSDF

GSDF定义了节点单位注入功率变化引起的支路潮流的变化量^[10-13],当节点 i 注入有功变化 ΔP_i 时,支路 k 有功功率变化为 ΔP_{k-i} ,则节点 i 对支路 k 的发电转移分布因子 A_{k-i} 为

$$A_{k-i} = \frac{\Delta P_{k-i}}{\Delta P_i} \quad (1)$$

在直流潮流模型下,GSDF的计算公式为

$$A_{k-i} = \frac{\mathbf{M}_k^T \mathbf{X}_i}{x_k} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{M}_k^T$ 为支路 k 的节点关联向量; $\mathbf{X}_i$ 为直流潮流电纳矩阵 $\mathbf{B}$ 的逆矩阵 $\mathbf{X}$ 的第 i 个列向量; x_k 为支路 k 的电抗。

GSDF的概念蕴涵了平衡机假设,其物理意义是:对于发电机节点 g , A_{l-g} 表示发电机 g 增加单位有功出力,平衡机减少单位有功出力时支路 l 的有功增量;对于负荷节点 h , A_{l-h} 表示 h 切除单位负荷,平衡机减少单位有功出力时支路 l 的有功增量。当平衡机出力不变,节点 i 增加单位注入有功,节点 j 减少单位注入有功,线路 l 的有功变化量为

$$\Delta P_{l-(i-j)} = A_{l-(i-j)} = A_{l-i} - A_{l-j} \quad (3)$$

因此,当节点 i 为减出力节点,节点

关键词/Keywords

电力系统·
连锁过载跳闸·
平衡机·
发电转移分布因子·

国家自然科学基金(50777016),中央高校基本科研业务费专项资金(NO.12MS110)。

j 为加出力节点,对电网潮流进行调节时,控制节点组 $i-j$ 对线路 l 的灵敏度为 $-A_{l-(i-j)}$ 。

根据GSDF的物理意义,平衡机对过载线路的GSDF值为0。对于任一个节点 i ,当其增加单位出力或者切除单位负荷,平衡机减少单位出力时,线路 l 的有功变化量为 $A_{l-(i-r)}=A_{l-i}$ 。

控制节点组选择

为了保证系统功率平衡,采用反向等量配对调整法:为每一个减出力节点都找到一个与之配对的加出力节点,同时,每个控制节点组的加减出力调整量相等。

为了使系统的功率调整量最少,应优先调节对过载线路灵敏度较大的控制节点组,同时应保证不出现新的线路过载。

对于控制节点 i ,若 $A_{l-i}>0$,则节点 i 减出力,平衡节点 r 加出力可以使线路 l 潮流减小;若 $A_{l-i}<0$,则节点 i 加出力或切负荷,平衡节点 r 减出力可以使线路 l 潮流减小。同理,对于控制节点组 $i-j$,若 $A_{l-(i-j)}>0$,则节点 i 减出力,节点 j 加出力或者切负荷,线路 l 的潮流量会减小;若 $A_{l-(i-j)}<0$,则节点 i 加出力或者切负荷,节点 j 减出力,线路 l 的潮流量会减小。 $A_{l-(i-j)}$ 的绝对值越大,控制节点组 $i-j$ 对线路 l 的控制能力越强。

为了避免切负荷,优先调节发电机节点。设系统中发电机节点(包括平衡机节点)个数为 m ,可切负荷节点个数为 n ,将除平衡机以外的发电机节点按照GSDF由大到小进行排序,将负荷节点按照GSDF由小到大进行排序,分别形成发电机序列 $\mathbf{P}: p_1, p_2, p_3, \dots, p_{m-1}$ 和负荷序列 $\mathbf{Q}: q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 。

对于平衡节点的排序处理如下。

1) 对于过载线路 l ,若任一发电机节点 i 满足 $A_{l-i}>0$,则说明任一发电机节点 i 与平衡机配合,当节点 i 减出力,平衡节点 r 加出力,都可以使过载线路 l 的潮流减少,即平衡节点 r 为最佳加出力节点,将节点 r 排在 p_{m-1} 之后。

2) 对于过载线路 l ,若任一发电机节点 i 满足 $A_{l-i}<0$,则说明任一发电机节点 i 与平衡机配合,

当平衡节点 r 减出力,节点 i 加出力,都可以使过载线路 l 的潮流减少,即平衡节点 r 为最佳减出力节点,将节点 r 排在 p_1 之前。

3) 对于过载线路 l ,若对于发电机节点 i 满足 $A_{l-i}>0$,对于发电机节点 j 满足 $A_{l-j}<0$,且节点 i 和 j 在序列 $\mathbf{P}$ 中相邻,则将平衡节点 r 插在节点 i 与节点 j 之间。

按照序列 $\mathbf{P}$ 中节点顺序,从节点 p_1 开始按升序选择减出力节点 A ,从节点 p_m 开始按降序选择加出力节点 B ,利用控制节点组 $A-B$ 进行控制,利用后文方法得到的调整量进行调整,利用广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)测量的调整后系统中的支路功率判断过载是否消除,若是,则紧急控制结束;若过载依旧存在,则 A 或 B 中有不再可调节节点,若 A (B)为不可调节节点,则在序列 $\mathbf{P}$ 中继续升序(或者降序)选择下一控制节点,继续进行下一轮调整,直至过载消除。

当所有可加出力发电机的可调量都为0时,开始采取切负荷措施,按照 $\mathbf{Q}$ 中节点排序按升序选取切负荷节点 C 与减出力发电机 D 配合控制,利用后文方法得到的调整量进行调整,利用WAMS测量的调整后系统中的支路功率判断过载是否消除,若是,则紧急控制结束;若过载依旧存在,则 C 或 D 中有不再可调节节点,则从不再可调节节点所属的序列中按升序选择下一节点,继续进行下一轮调整,直至过载消除。

需要说明的是,若多个节点的GSDF值相同,当从中选取减出力节点(或加出力节点)时,则选取其中可减出力量(或可加出力量)最大的节点作为控制节点。

功率调整量的计算

支路最大传输功率既受到热稳定功率极限的限制,也受到其后备保护整定值所对应的最小传输功率的限制,应将支路最大允许传输功率取为上述二者中的最小值^[14]。将支路热稳定功率极限作为其最大传输功率,实际电网运行中依情况而定。

根据反向等量配对调整法, 每个控制节点组中减出力节点*i*和加出力节点*j*的调整量都相等, 其调整目标是在控制节点*i*和*j*的可调量范围内, 消除过载线路的过负荷, 同时保证没有新线路过载。

当减出力节点*i*和加出力节点*j*配对调整时, 对于任一线路*k*, 其控制节点组的灵敏度为 $-A_{k-(i-j)}$ 。

设过载线路*m*的功率为 P_m , 热稳定功率极限为 $P_{m\max}$, 考虑到GSDF以及调整量计算误差等因素, 定义可靠系数 $\xi < 1$ 。要消除线路*m*过载, 控制节点组*i-j*需要调整的功率量为

$$\Delta P_m = (P_m - \xi P_{m\max}) / (-A_{m-(i-j)}) \quad (4)$$

取 $\xi = 0.95$, 实际电网运行中可根据情况适当取值。

为避免紧急控制过程中出现新的支路过载, 要考虑控制节点组*i-j*对正常线路的控制作用。对于正常线路集合*N*中任一条线路*n*, 若 $A_{n-(i-j)} > 0$, 说明控制节点组*i-j*会使正常线路*n*的潮流增加, 将线路*n*归入潮流增加线路集合*Z*, 并根据其功率冗余量对*i-j*的调整量进行限制, 即调整量不能超过

$$\Delta P_{n-(i-j)} = (P_{n\max} - P_n) / A_{n-(i-j)} \quad (5)$$

为了保证潮流增加线路集合*Z*中所有线路不过载, 控制节点组*i-j*的调整量不能超过 $\Delta P_z = \min\{\Delta P_{n-(i-j)} | n \in Z\}$

同时, 控制节点组*i-j*的调整量还要受到节点*i*的可减出力量 ΔP_i 和节点*j*的可增出力量 ΔP_j 的限制。

综上所述, 控制节点组*i-j*的最终调整量为

$$\Delta P_{ij} = \min\{\Delta P_m, \Delta P_z, \Delta P_i, \Delta P_j\} \quad (6)$$

需要注意以下几方面。

1) 若加出力节点*j*是平衡机, 考虑到平衡机需要担负调频等任务, 在计算其可调量时, 预留出一定裕度, 可调量计算公式为

$$\Delta P_j = P_{j\max} - P_y - P_j \quad (7)$$

式中, $P_{j\max}$ 为平衡机最大发电量; P_y 为平衡机预留裕度; P_j 为平衡机目前发电量。取 $P_y = 10$ MW, 实际电网运行中可根据情况适当取值。

2) 每一轮调整后, 平衡机节点的可调量利

用WAMS刷新, 其他节点的可调量可利用计算刷新。当平衡机的可调量小于5 MW时, 将其可调量视为0。

3) 每一轮调整后, 修正控制节点组的可调量, 并利用WAMS刷新电网所有支路功率, 判断线路过载是否消除, 若需要继续进行下一轮紧急控制, 则根据刷新后的数据计算新一轮调整量。

算法流程图

某些线路因故障断开引起潮流转移, 快速搜索其潮流转移路径并确定存在过载风险的潮流转移危险线路, 对潮流转移危险线路进行重点监视, 一旦发现过载, 立即闭锁其过负荷后备保护并采取紧急控制措施消除过载。紧急控制步骤如图1所示。

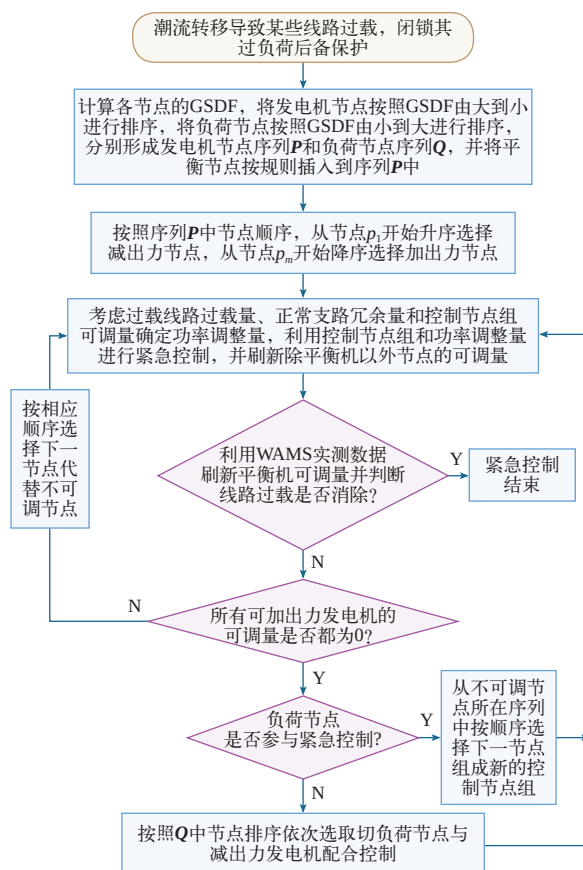


图1 紧急控制算法流程图

算例

在IEEE 39节点系统中对该方法进行验证, 其

系统接线图如图2所示。该系统中节点31是平衡机,计算该节点出力可增量时已留出10 MW的裕度量。

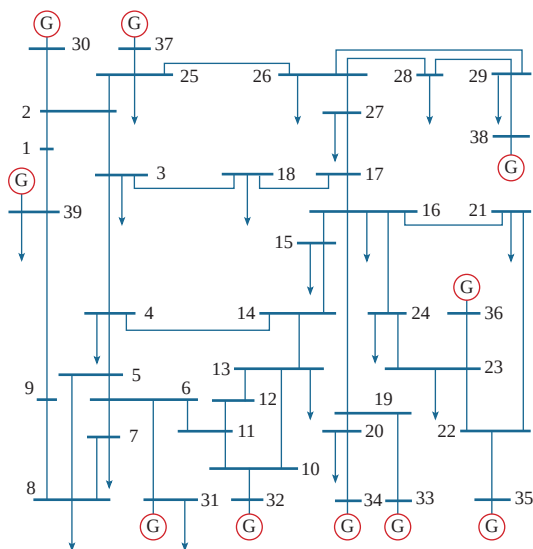


图2 IEEE39节点系统

线路14-4和6-5因故障同时断开,导致线路6-7过载,过载功率为973.25 MW,其热稳定功率极限为900 MW。计算各节点对过载线路的GSDF,并根据GSDF值形成发电机序列 P 和负荷序列 Q 。计算得到所有节点的GSDF均为负值,因此平衡节点31为最佳减出力节点,各发电机节点的GSDF值如下表所示,因篇幅有限,本文未列出负荷序列 Q 。

表 发电机序列 P

排序	节点	对6-7的GSDF
1	31	0
2	32	-0.093 2
3	34	-0.440 3
4	33	-0.440 3
5	36	-0.440 3
6	35	-0.440 3
7	38	-0.566 0
8	37	-0.623 7
9	30	-0.639 1
10	39	-0.771 2

按顺序选择减出力节点31和加出力节点39进行控制,节点31可减出力为583.93 MW,节点39

可加出力为100 MW。计算31-39对其他正常线路的灵敏度,考虑过载线路过载量、正常线路冗余量和控制节点可调量,确定功率调整为100 MW,调整后线路6-7的功率为896.13 MW,过载消除,紧急控制结束。

若采用不使平衡机参与紧急控制的方案,则应选取选择减出力节点32和加出力节点39进行控制,节点32可减出力为650 MW,节点39的可加出力为100 MW,计算32-39对其他正常线路的灵敏度,利用本文方法计算功率调整为100 MW,调整后线路6-7功率为905.39 MW,依旧过载,需要进行紧急控制。此时节点39的可增出力已经为0,需要降序选择下一节点30作为加出力节点,因此第二轮紧急控制选取控制节点组为32-30,其中节点32的可减出力为550 MW,节点30的可加出力为790 MW,计算32-39对其他正常线路的灵敏度,利用本文方法计算功率调整为88.373 8 MW,调整后线路6-7功率为857.5 MW,过载消除,紧急控制结束。

需要说明的是利用式(4)计算得到31-39需要调整的功率量为153.325 7 MW,但本算例中节点39的可调量为100 MW,因此功率调整量最终选为100 MW。式(6)中 $\xi=0.95$,即利用控制节点组31-39将6-7的功率由973.25 MW降为 0.95×900 MW需要的调整量是153.325 7 MW,当调整量为100 MW时线路6-7的功率降为896.13 MW,满足消除过载的要求。可靠系数 $\xi < 1$,其作用是防止计算误差导致所选的调整量不满足消除过载的要求,实际运行中根据情况适当取值。

若节点39的可调量足够大,对于过载线路6-7,控制节点组31-39的灵敏度大于控制节点组32-39的灵敏度,因此前者的功率调整量会小于后者。

综上分析,利用本文方法,将平衡机参与紧急控制,在本算例中,采用31-39进行紧急控制,一轮调整就可以消除过载,调整量为100 MW;若采用以往方法,不使平衡机参与控制,则需要两轮紧急控制,总调整量为188.373 8 MW。因此,采用该方法,将平衡机参与紧急控制,在调整时

间、调整节点数量和总功率调整量上都有显著优势。在计算功率调整量时,考虑了正常线路冗余量约束计算功率调整量,有效避免了潮流校验,提高了紧急控制速度。

结束语

提出了一种考虑平衡机参与的防连锁过载跳闸策略,分析了GSDF的特点及其物理意义,指出了平衡机参与紧急控制时控制节点选择方法及灵敏度确定方法,利用反向等量调整法并考虑正常线路冗余量约束计算功率调整量,有效避免了潮流校验,提高了紧急控制速度。仿真算例表明,将平衡机参与紧急控制,在调整时间、调整节点数量和总功率调整量上有显著优势。

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):58-63.

[2] 王增平,李刚,任建文.基于前K最短路径的输电断面搜索新算法[J].电工技术学报,2012,27(4):193-201.

[3] 苗世洪,马帅,尚亚男,等.基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J].电力系统自动化,2014,38(2):39-45.

[4] 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.

[5] 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):5-8.

[6] 李刚,王增平,任建文,等.基于图论分区与改进 BFS 算法搜索安全约束集的防连锁过载控制策略[J].电工技术学报,2012,27(11):219-229.

[7] 姚峰,张保会,周德才,等.输电断面有功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.

[8] 姜臻,苗世洪,刘沛,等.一种基于粒子群优化算法的转移潮流控制策略[J].电力系统自动化,2010,34(18):16-20.

[9] 袁晓丹,张会强.多支路开断潮流转移识别及防连锁过载策略研究[J].现代电力,2014,31(5):74-79.

[10] 沈瑜,夏清,康重庆.发电联合转移分布因子及快速静态安全校核算法[J].电力系统自动化,2003,27(18):13-17.

[11] 童星,康重庆,陈启鑫,等.虚拟母线技术及其应用(一):虚拟母线辨识算法[J].中国电机工程学报,2014,34(4):596-604.

[12] 於益军,刘俊,冯树海,等.基于开断灵敏度的静态安全分析辅助决策[J].中国电力,2013,46(3):53-58.

[13] 张剑云,孙元章.基于脆弱割集选择紧急控制地点的灵敏度分析方法[J].电网技术,2007,31(11):21-26.

[14] 杨文辉.预防连锁跳闸的关键线路后备保护与紧急控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2012.

(收稿日期:2015-01-30) EA

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告