

基于广域保护系统的距离后备保护整定方案

谷松林

(国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘要: 电网中发生潮流转移现象后, 受影响的输电线路会承受大量的转移负荷, 进入过负荷运行状态。距离保护后备段的整定要求避开线路正常运行时的最小负荷阻抗, 因此潮流转移带来的线路过负荷将会对距离保护后备段带来显著影响。针对这一情况, 提出了一种能够应对潮流转移情况的距离后备保护整定方案。该方案基于广域保护系统, 利用 WAMS 可测幅值与相角的特点快速计算线路的视在阻抗值。然后根据线路视在阻抗的变化幅度确定线路所承受的转移负荷比例, 针对线路不同的过负荷状态进行与之对应的后备保护整定值调整, 既防止过负荷线路上的后备保护发生误动, 又使后备保护保有正确识别短路故障的能力。最后将整定信息与负荷波动情况上传至调度中心, 为调度中心进行负荷控制提供辅助决策, 并依据调度中心的决策进一步调整后备保护的整定值, 直至线路恢复正常的负荷输送状态。以新英格兰 10 机 39 节点系统为样例, 采用 BPA 仿真验证了该方案的有效性。

关键词: 潮流转移; 过负荷; 广域测量系统; 距离后备保护

A distance backup protection setting scheme based on wide area protection system

GU Songlin

(State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The transmission line affected by the flow transfer will enter a state of overload operation. The setting value of the distance backup protection needs to avoid the minimum load impedance. As a result, the flow transferring will bring significantly impacts to the distance backup protection. Focusing on this situation, this paper raises a distance backup protection setting scheme to cope with the flow transferring. This scheme is based on the wide area protection system. First, the WAMS is used to quickly calculate the apparent impedance value on the transmission line. Then, the flow transfer ratio on the lines is calculated according to the variation of the apparent impedance. For lines of different states of overload, the corresponding setting values adjustment method is used for backup protection. The adjustment method can not only prevent the mistake actions of the backup protection on the overload lines, but also can identify the short-circuit faults on the lines which are protected. At last, the setting information and load fluctuation are uploaded to the dispatch center as auxiliary information. So that the dispatch center can make a decision about the load control. On the basis of this decision, the setting value of the backup protection is further adjusted until the transmission line is returned to the normal state of load. The New England 10-unit 39-bus system is taken as an example. This method is verified by the BPA simulation.

Key words: power flow transfer; overload; wide area measurement system (WAMS); distance backup protection

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2016)01-0040-08

0 引言

潮流转移是使电网发生连锁跳闸现象的重要诱因, 若不及时采取有效的抑制措施将导致电网发生大停电事故, 严重威胁电力系统的安全稳定运行^[1-4]。在此研究方向上国外起步较早, 建立了与大停电相关的连锁故障模型, 并指出在潮流转移情况

下, 后备保护的过负荷误动是引发连锁跳闸的重要原因^[5-7]。为解决这一问题, 近年来在研究中引入了图论的相关知识, 提出了输电断面的概念^[8], 通过划分输电断面来快速搜索受潮流转移影响的过负荷支路, 如文献[9]研究了基于转移潮流灵敏度因子的潮流转移识别方案; 文献[10]根据实际电网结构利用图论知识生成有向图, 建立送端节点-送电支路邻

接表, 计算支路开断分布因子, 识别受潮流转移影响较大的线路; 文献[11]利用图论将电网拓扑图划分为多个广义潮流转移区域, 将区域外节点与其相应的区域连接割点等效为虚拟母线, 使计算范围从全网简化到过载线路所属的广义潮流转移区域; 文献[12]给出了用于评价支路受潮流转移影响程度的过载严重度指标; 文献[13]通过预测线路故障时间和概率的方法来识别潮流转移的发生。上述研究简化了复杂的网络计算, 能够快速识别系统中受潮流转移影响的区域, 但并没有从后备保护角度解决过负荷误动的问题。

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)的出现和发展^[14-16], 为电力系统的安全稳定与保护控制研究开辟了新的数据来源和分析角度, 也为从后备保护角度解决与潮流转移相关的问题提供了新的思路, 如文献[17-18]根据估算发生潮流转移后电网中潮流分布的潮流转移因子来判别后备保护是否会发生过负荷误动; 文献[19]研究了系统振荡对潮流转移过负荷识别的影响, 分析了过负荷、系统振荡和故障的特点; 文献[20-21]通过划分维持系统生存性所必需的关键元件和网络结构来定义系统的关键线路, 对关键线路上的后备保护采用过负荷闭锁的方法来防止其误动; 文献[22]结合模型量化、平均功率角和潮流转移灵敏度来界定潮流转移的影响区域。上述研究的重点偏向于过负荷线路识别, 对于后备保护的过负荷误动采用选择性闭锁来解决。若将线路承受转移负荷定义为一种特殊的运行状态, 则在此运行状态下后备保护尚缺乏一套详细的整定方案。

针对当前的研究现状, 本文提出了一种能够应对潮流转移情况的距离后备保护整定方案。该方案基于广域保护系统, 实现流程如图 1 所示。首先广域保护系统实时同步信息主站上传至调度中心的 WAMS 数据, 利用电力系统同步相量测量装置(Phasor Measurement Unit, PMU)可测幅值与相角的特点, 将测量值快速归算为与保护整定相关的视在阻抗值; 然后根据线路视在阻抗的变化幅度确定线路所承受的转移负荷比例, 针对线路不同的过负荷状态进行与之对应的后备保护整定值调整, 既防止过负荷线路上的后备保护发生误动, 又使后备保护保有正确识别短路故障的能力; 最后将整定信息与负荷波动情况上传至调度中心, 为调度中心进行负荷控制提供辅助决策, 并依据调度中心的决策进一步调整后备保护的整定值, 直至线路恢复正常的负荷输送状态。所提方法计算规模较小, 具有良好的

可靠性与灵敏性, 同时通过调度中心能够与故障定位、负荷控制等成熟方法友好关联, 具有良好的现实意义。

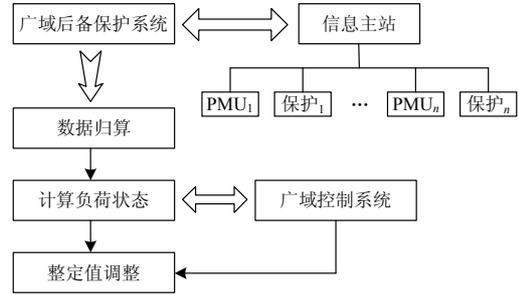


图 1 新型广域保护系统

Fig. 1 A novel wide area backup protection system

1 利用广域信息进行保护整定归算

从图 2 所示的二端口等效模型来计算作为系统条件函数的视在阻抗 Z_R 。设 U_R 和 I_R 是 E_S 和 E_U 的线性函数, 则有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & -m_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_S \\ \dot{E}_U \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & -m_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

是一个复常量矩阵, \mathbf{M} 中的元素为短路参数, 因为它们定义在 E_S 或 E_U 为 0 的基础上, 如式(3)、式(4)所示。

$$m_1 = \left[\frac{\dot{U}_R}{\dot{E}_S} \right]_{\dot{E}_U=0} \quad m_2 = \left[\frac{\dot{U}_R}{\dot{E}_U} \right]_{\dot{E}_S=0} \quad (3)$$

$$m_3 = \left[\frac{\dot{I}_R}{\dot{E}_S} \right]_{\dot{E}_U=0} \quad m_4 = \left[\frac{\dot{I}_R}{\dot{E}_U} \right]_{\dot{E}_S=0} \quad (4)$$

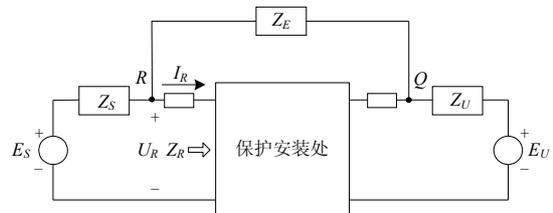


图 2 输电线路二端口等效模型

Fig. 2 Two-port equivalent network of transmission line

根据式(1)可以计算出继电器处阻抗为

$$\dot{Z}_R = \frac{\dot{U}_R}{\dot{I}_R} = \frac{m_1 \dot{E}_S + m_2 \dot{E}_U}{m_3 \dot{E}_S - m_4 \dot{E}_U} \quad (5)$$

将式(5)上下同除以 E_U , 然后整理为只含有 1 项 E_S/E_U 的形式:

$$\dot{Z}_R = \frac{m_1}{m_3} - \left[\frac{(m_1/m_3) + (m_2/m_4)}{1 - (m_3/m_4)(\dot{E}_S/\dot{E}_U)} \right] \quad (6)$$

将式(6)中的复参数进行定义,其中阻抗参数定义为

$$\dot{Z}_Y = \dot{Z}_Z + \dot{Z}_X = \frac{m_1}{m_3} + \frac{m_2}{m_4} \quad (7)$$

无量纲参数定义为

$$\dot{c} = \frac{m_3}{m_4} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6)可得

$$\dot{Z}_R = \dot{Z}_Z - \frac{\dot{Z}_Y}{1 - (\dot{c}\dot{E}_S/\dot{E}_U)} \quad (9)$$

为了将式(9)中的复参数写为幅值与相角的形式,进行如下定义:

$$\begin{cases} \dot{Z}_X = Z_X \angle \alpha_X \\ \dot{Z}_Y = Z_Y \angle \alpha_Y \\ \dot{Z}_Z = Z_Z \angle \alpha_Z \\ \dot{c} = c \angle \alpha_n \\ \dot{E} = \dot{E}_S / \dot{E}_U = E \angle \theta \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)可以将式(9)改写为

$$\dot{Z}_R = Z_Z \angle \alpha_Z - \frac{Z_Y \angle \alpha_Y}{1 - cE \angle (\alpha_n + \theta)} \quad (11)$$

式(11)中的各个元素均可通过信息主站上传的PMU数据快速得到,为后备保护的在线整定提供了先决条件。

2 距离后备保护的过负荷界限

线路过负荷会导致保护安装处的视在阻抗减小,使视在阻抗落入整定圆中,造成保护误动。为了消除这种误动,考虑将整定圆按照某种比例关系进行收缩,躲开过负荷对保护的影响。整定圆的收缩需要满足以下两个条件:

1) 线路承受过负荷后,保护安装处视在阻抗幅值减小,视在阻抗相角会发生小幅度的变化。当视在阻抗落入整定圆中将会引起保护的误动。整定圆的收缩应确保视在阻抗落在整定圆外。

2) 线路承受的过负荷越多,整定圆需要进行的收缩幅度越大。当整定圆收缩到一定程度时将会出现无法识别短路故障的情况。整定圆的收缩应确保故障阻抗落在整定圆内。

如图3所示, \dot{Z}_{R1} 为正常运行状态时的视在阻抗,对应相角为 φ_1 ; \dot{Z}_{R2} 为线路承受转移负荷后的视在阻抗,对应相角为 φ_2 ; \dot{Z}_{set1} 为距离保护III段初

始整定阻抗,对应相角为 θ ; \dot{Z}_{set2} 为距离保护III段收缩后的整定阻抗,对应相角为 θ ; \dot{Z}_F 为最大短路阻抗,在后备保护覆盖的范围内短路点距保护安装处最远时求出,对应相角为 α 。根据整定圆收缩需要满足的两个条件,当 \dot{Z}_{R2} 、 \dot{Z}_F 均落在整定圆 \dot{Z}_{set2} 上时为临界状态。

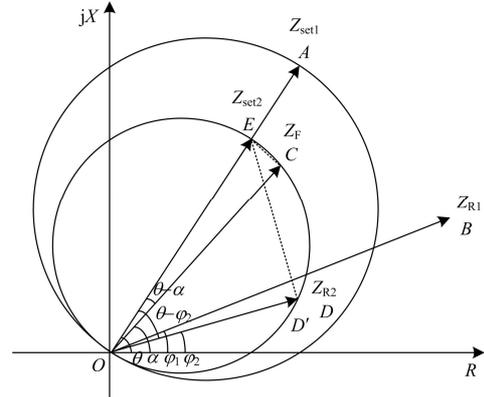


图3 整定圆收缩的临界状态

Fig. 3 Critical state of setting circle contraction

已知

$$\begin{cases} \dot{Z}_{set1} = Z_{set1} \angle \theta = r_{set1} + jx_{set1} \\ \dot{Z}_{R1} = Z_{R1} \angle \varphi_1 = r_{R1} + jx_{R1} \\ \dot{Z}_{R2} = Z_{R2} \angle \varphi_2 = r_{R2} + jx_{R2} \\ \dot{Z}_F = Z_F \angle \alpha = r_F + jx_F \end{cases} \quad (12)$$

式中: \dot{Z}_{set1} 为初始整定值; \dot{Z}_{R1} 、 \dot{Z}_{R2} 可以通过PMU数据得到; \dot{Z}_F 可以通过故障计算得到。

首先推导过负荷前后视在阻抗 \dot{Z}_{R1} 与 \dot{Z}_{R2} 的关系。线路过负荷可以等效为接入一个新增的注入电流源。只考虑幅值关系,线路的过负荷可以近似地用视在阻抗幅值的波动来表示,设 P_1 为正常状态, P_2 为过负荷状态(承受正常状态 $n\%$ 的过负荷),则满足如下关系:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Z_{R2} \cos \varphi_2}{Z_{R1} \cos \varphi_1} = \frac{100}{100 + n} \quad (13)$$

根据图3所示则有

$$\frac{OD}{OB} = \frac{100 \cos \varphi_1}{(100 + n) \cos \varphi_2} \quad (14)$$

式(14)中OB的值为

$$OB = \frac{x_{R1}}{\sin \varphi_1} \quad (15)$$

根据式(14)、式(15)可以求出OD的值为

$$OD = \frac{100 x_{R1} \cos \varphi_1}{(100 + n) \sin \varphi_1 \cos \varphi_2} \quad (16)$$

然后根据临界条件, 求解能够识别故障的最小整定圆 Z_{set2} 。图 3 中 $\triangle OCE$ 为直角三角形, 按照角度关系求解 OE 为

$$OC = \frac{x_F}{\sin \alpha} \quad (17)$$

$$OE = \frac{OC}{\cos(\theta - \alpha)} = \frac{x_F}{\sin \alpha \cos(\theta - \alpha)} \quad (18)$$

图 3 中 $\triangle ODE$ 为直角三角形, 按照角度关系求解 OD' 的值为

$$OD' = OE \times \cos(\theta - \varphi_2) = \frac{x_F \cos(\theta - \varphi_2)}{\sin \alpha \cos(\theta - \alpha)} \quad (19)$$

根据临界条件, 负荷阻抗 Z_{R2} 要落在整定圆 Z_{set2} 外需要满足

$$OD \geq OD' \quad (20)$$

考虑到过渡电阻与测量误差的影响, 为确保可靠性整定圆保留 30% 的裕度, 则式(20)应改写为

$$OD \geq 1.3OD' \quad (21)$$

根据式(16)可知, OD 为关于 n 的减函数, 因此在式(21)取等号时 n 有最大值。将 n 的最大值定义为距离后备保护整定的过负荷界限 μ :

$$\mu = \frac{100x_{R1} \cos(\theta - \alpha) \sin \alpha \cos \varphi_1}{1.3x_F \cos(\theta - \varphi_2) \sin \varphi_1 \cos \varphi_2} - 100 \quad (22)$$

距离后备保护整定值的自适应调整应以过负荷界限 μ 为标准, 在界限上下采取相对应的调整法。

3 潮流转移后距离后备保护的整定方案

根据上文所述, 潮流转移后距离后备保护的整定分为过负荷界限内整定和过负荷界限外整定两部分。

3.1 过负荷界限内调整方法

过负荷界限内的整定采用比例收缩的方式, 如图 4 所示。

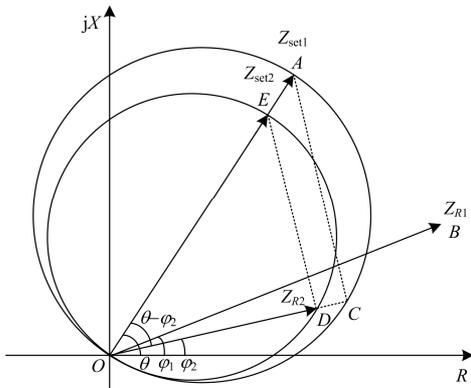


图 4 过负荷界限内整定圆调整

Fig. 4 Adjusting setting circle within the boundaries of overload

取负荷阻抗落在整定圆上的临界状态, 整定圆的收缩满足如下比例关系:

$$\frac{OE}{OA} = \frac{OD}{OC} \quad (23)$$

OA 可由初始整定值求出。

$$OA = \frac{x_{set1}}{\sin \theta} \quad (24)$$

图 4 中 $\triangle OCA$ 为直角三角形, 按照角度关系求解 OC 为

$$OC = OA \times \cos(\theta - \varphi_2) = \frac{x_{set1} \cos(\theta - \varphi_2)}{\sin \theta} \quad (25)$$

OD 根据式(16)可以求出。将 OC 、 OD 代入式(23)可得

$$\frac{OE}{OA} = \frac{100x_{R1} \cos \varphi_1 \sin \theta}{(100+n)x_{set1} \cos \varphi_2 \sin \varphi_1 \cos(\theta - \varphi_2)} \quad (26)$$

令

$$\lambda = \frac{100x_{R1} \cos \varphi_1 \sin \theta}{(100+n)x_{set1} \cos \varphi_2 \sin \varphi_1 \cos(\theta - \varphi_2)} \quad (27)$$

则式(26)可以简写为

$$OE = \lambda \times OA \quad (28)$$

式(28)中 OA 为原整定圆直径, OE 为新整定圆直径。为确保整定圆避开负荷阻抗不发生误动, 在临界状态下取 10% 的裕度, 可得调整系数为

$$K_z = 0.9\lambda \quad (29)$$

根据式(29)可以快速求解收缩后的整定值 Z_{set2} 为

$$Z_{set2} = K_z Z_{set1} \quad (30)$$

3.2 过负荷界限外调整方法

过负荷界限内的整定采用橄榄收缩的方式, 如图 5 所示。

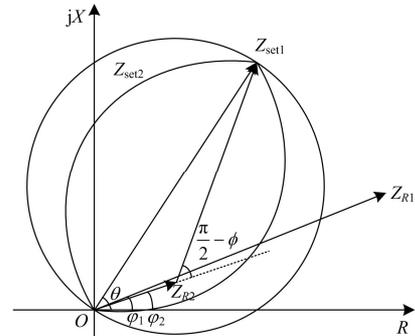


图 5 过负荷界限外整定圆调整

Fig. 5 Adjusting setting circle outside the boundaries of overload

考虑保留最多的整定圆范围, 在原整定值 Z_{set1} 的基础上进行橄榄形收缩, 在临界状态下求解橄榄形需要收缩的角度为

$$\phi = 90^\circ - \arg \frac{\dot{Z}_{set1} - \dot{Z}_{R2}}{\dot{Z}_{R2}} \quad (31)$$

根据式(31)计算出的 ϕ 为临界角, 应乘以可靠系数 $k(k>1.2)$ 来确定动作区域, 从而确保 Z_{R2} 落在动作区域外。因此过负荷界限外整定的最终结果为

$$-90^\circ + k\phi \leq \arg \frac{\dot{Z}_{set1} - \dot{Z}_{R2}}{\dot{Z}_{R2}} \leq 90^\circ - k\phi \quad (32)$$

3.3 整定方案实现流程

距离III段作为线路的后备保护其动作时间与距离I段相比具有 0.5 s 的时延, 因此为了应对潮流转移带来的负荷波动, 距离III段整定值的调整过程要求在 0.5 s 内完成。基于 WAMS 的保护系统能够实时同步调度中心的 PMU 数据, 根据网络拓扑确定每个继电器的保护范围, 进而在 0.5 s 内快速完成后备保护整定值的调整。调整完成后将保护配置信息上传至调度中心, 为调度中心的决策提供辅助信息, 实现调度控制中心与就地保护装置相互配合的调整方案。具体流程如图6所示。

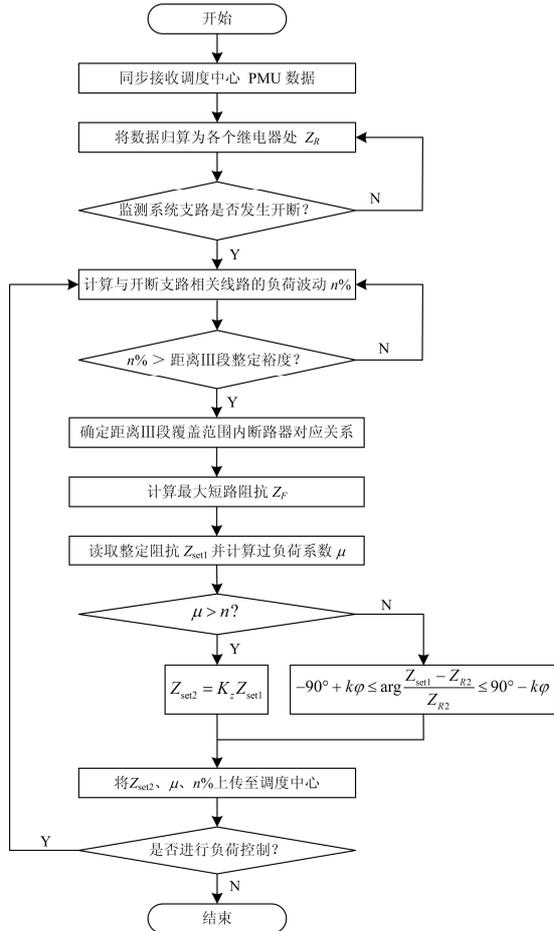


图6 整定调整流程图

Fig. 6 Setting adjustment flow chart

4 算例分析

4.1 新英格兰 10 机 39 节点系统

采用新英格兰 10 机 39 节点系统对本文所述距离后备保护整定方案进行验证分析, 系统的单线图及其支路编号如图 7 所示。

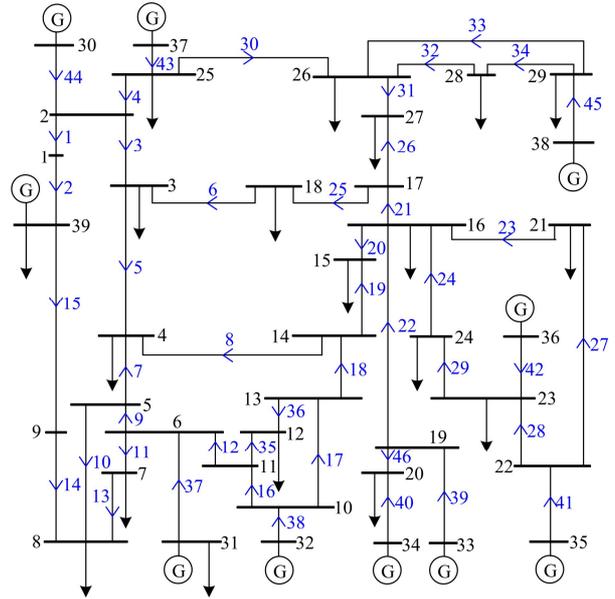


图7 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig. 7 New England 10-unit 39-bus test system

4.2 距离后备保护整定值调整过程

设系统在 T_1 时刻突然切除正常运行中的线路 11, 然后以线路 10 上距离继电器为例进行后备保护的重新整定。

将同步接收的 PMU 数据实时归算为继电器处的视在阻抗, 线路 10 靠近母线 8 处继电器在 T_1 时刻前后视在阻抗分别为 $Z_{R1}=30.5154+5.6292i$ 、 $Z_{R2}=14.2138+3.4738i$; 由于相邻线路发生开断, 判定为潮流转移状态, 根据式(13)计算负荷波动为 $n=112.0692$, 可见线路 10 承受 112.0682% 的转移负荷, 超过了距离III段的整定裕度, 需进行整定值调整。

线路 10 上靠近母线 8 处继电器作为后备保护覆盖至线路 5。设 T_2 时刻线路 5 靠近母线 3 处发生单相接地短路, 此时该继电器处有最大短路阻抗 $Z_F=13.1319+6.9032i$; 根据式(22)计算过负荷界限为 $\mu=114.3890$; 由于 $n<\mu$, 采取过负荷界限内整定方法, 根据式(27)、式(29)求解调整系数为 $K_z=0.6760$, 读取原整定阻抗 $Z_{set1}=11.6340+31.9630i$, 根据式(30)求出调整后的整定阻抗 $Z_{set2}=7.8670+21.6120i$, 至此完成整定调整。采用 BPA 进行仿真计算, 线路

10 功率波动如图 8 所示, 整定圆收缩过程如图 9 所示, T_1 时刻之前视在阻抗落在整定圆 Z_{set1} 外, T_1 至 T_2 时刻之间视在阻抗落在收缩后的整定圆 Z_{set2} 外, T_2 时刻后视在阻抗为故障阻抗, 落在整定圆 Z_{set2} 内。

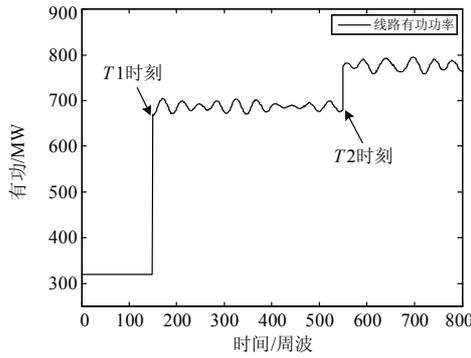


图 8 线路 10 有功功率变化过程

Fig. 8 Changing processes of active power on line 10

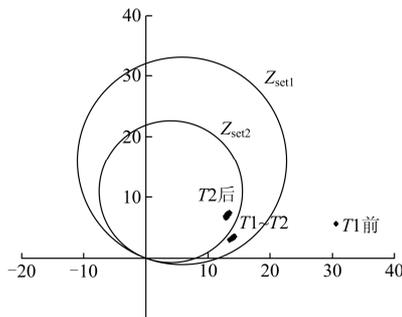


图 9 距离 III 段整定值调整过程

Fig. 9 Adjusting setting circle of zone 3 impedance relay

为验证界限外整定方法, 需要在线路 11 切除后进一步加大线路 10 的过负荷程度。设系统在 T_3 时刻切除线路 14, 此时母线 7、母线 8 所带的负荷均需通过线路 10 传输, 相关线路上的负荷进一步向线路 10 发生转移。线路 10 靠近母线 8 处继电器在 T_3 时刻后视在阻抗为 $Z_{R2}=13.2138+3.7738i$; 由于相邻线路发生开断, 判定为潮流转移状态, 根据式(13)计算负荷波动为 $n=125.8040$ 。

设 T_4 时刻线路 5 靠近母线 3 处发生单相接地短路, 此时该继电器处有最大短路阻抗 $Z_F=12.0556+6.9261i$; 根据式(22)计算过负荷界限为 $\mu=123.6710$; 由于 $n>\mu$, 采取过负荷界限外整定方法, 根据式(33)求解收缩角度为 $\phi=12.731^\circ$; 取可靠系数 $k=1.2$, 代入式(34)求解整定圆收缩为橄榄形后的临界角为 73.449° , 至此完成整定调整。采用 BPA 进行仿真计算, 线路 10 功率波动如图 10 所示, 整定圆收缩过程如图 11 所示, T_1 时刻之前视在阻

抗落在整定圆 Z_{set1} 外, T_1 至 T_3 时刻之间视在阻抗落在收缩后的整定圆 Z_{set2} 外, T_3 至 T_4 时刻之间视在阻抗落在进一步收缩后的整定圆 Z_{set3} 外, T_4 时刻后视在阻抗为故障阻抗, 落在整定圆 Z_{set3} 内。

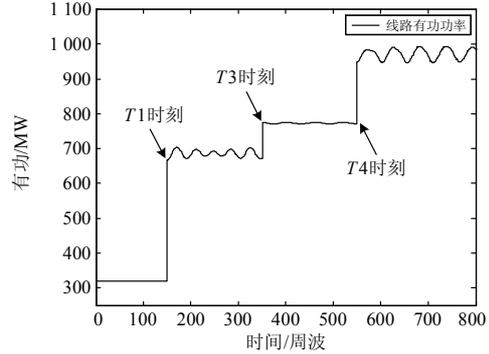


图 10 线路 10 有功功率变化过程

Fig. 10 Changing processes of active power on line 10

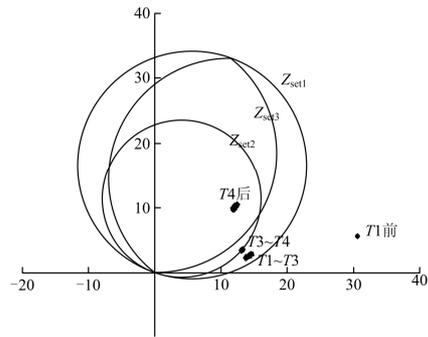


图 11 距离 III 段整定值调整过程

Fig. 11 Adjusting setting circle of zone 3 impedance relay

进一步验证该整定方法与调度中心负荷控制的相互配合。在 T_1 时刻线路 11 切除后, 线路 10 承受大量的转移负荷, 调度中心通过紧急控制措施来减小线路 10 的过负荷程度。设系统在 T_5 时刻切除线路 13, 此时母线 7 所带的负荷与系统分离, 减小了线路 10 的负荷输送要求, 因此线路 10 上的负荷向相邻线路发生了转移, 线路 10 上负荷减小。线路 10 靠近母线 8 处继电器在 T_5 时刻后视在阻抗为 $Z_{R2}=18.0422+3.4186i$; 由于相邻线路发生开断, 判定为潮流转移状态, 根据式(13)计算负荷波动为 $n=68.9802$ 。

设 T_6 时刻线路 5 靠近母线 3 处发生单相接地短路, 此时该继电器处有最大短路阻抗 $Z_F=11.4147+11.0123i$; 根据式(22)计算过负荷界限为 $\mu=164.6470$; 由于 $n<\mu$, 采取过负荷界限内整定方法, 根据式(27)、式(29)求解调整系数为 $K_2=0.9210$, 读取原整定阻抗 $Z_{set1}=11.6340+31.9630i$, 根据式(30)求出调整后的整定阻抗 $Z_{set2}=10.7130+29.4320i$, 至此完成整定调整。采用 BPA

进行仿真计算，线路 10 功率波动如图 12 所示，整定圆收缩过程如图 13 所示， T_1 时刻之前视在阻抗落在整定圆 Z_{set1} 外， T_1 至 T_5 时刻之间视在阻抗落在收缩后的整定圆 Z_{set2} 外， T_5 至 T_6 时刻之间视在阻抗落在放大后的整定圆 Z_{set3} 外， T_6 时刻后视在阻抗为故障阻抗，落在整定圆 Z_{set3} 内。

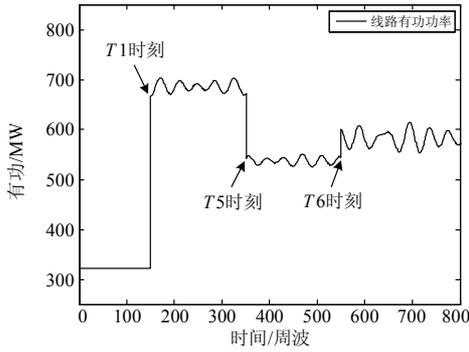


图 12 线路 10 有功功率变化过程

Fig. 12 Changing processes of active power on line 10

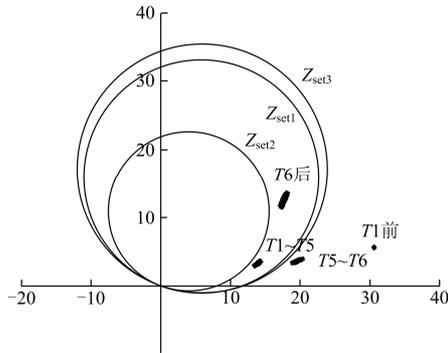


图 13 距离Ⅲ段整定值调整过程

Fig. 13 Adjusting setting circle of zone 3 impedance relay

从图 9、图 11、图 13 中可以看到在线路负荷发生变化时该整定调整方法的收缩过程。 T_1 时刻后视在阻抗落在了 Z_{set1} 内，整定圆收缩为 Z_{set2} 后消除了误动，如图 9 所示； T_3 时刻后，视在阻抗落在了 Z_{set2} 上，整定圆收缩为橄榄形 Z_{set3} 后消除了误动，如图 11 所示； T_5 时刻后，故障阻抗落在了小圆外，整定圆放大为 Z_{set3} 后恢复了识别故障的能力，如图 13 所示。经过整定调整，确保了距离保护Ⅲ段不会发生误动，同时保有正确识别短路故障的能力。

5 结论

本文利用 WAMS 可测幅值与相角的特点，通过 PMU 的测量值快速计算线路的视在阻抗值，建立了线路视在阻抗的变化幅度与距离后备保护整定的对应关系，针对线路不同的过负荷状态进行与之对应的后备保护整定值调整，既防止过负荷线路上的后

备保护发生误动，又使后备保护保有正确识别短路故障的能力。

在后备保护整定调整的过程中，将整定信息与负荷波动情况实时上传至调度中心，为调度中心进行负荷控制提供辅助决策，并依据调度中心的决策进一步调整后备保护的整定值，直至线路恢复正常的负荷输送状态。所提方法通过调度中心能够与故障定位、负荷控制等成熟方法友好关联，具有良好的现实意义。仿真结果验证了该方案的有效性。

参考文献

- [1] 袁季修. 防御大停电的广域保护盒紧急控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 34-86.
- [2] 印永华, 郭剑波, 赵建军. 美加“8-14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 8-11.
- [3] YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnection north America power grid on August 14 and lesions to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 8-11.
- [4] 王克球, 张保会, 王立永, 等. 安全稳定控制系统的经济效益评价[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 31-37.
- [5] WANG Keqiu, ZHANG Baohui, WANG Liyong, et al. Assessment on economic benefit of security and stability control system[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 31-37.
- [6] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
- [7] HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6.
- [8] PHADKE A G, THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1996, 9(3): 20-23.
- [9] TAMRONGLAK C, HOROWITZ S H, PHADKE A G, et al. Anatomy of power system blackouts: preventive relaying strategies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 708-715.
- [10] WANG H, THORP J S. Optimal locations for protection system enhancement: a simulation of cascading outages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 528-533.
- [11] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
- [12] ZHOU Decai, ZHANG Baohui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.
- [13] 徐岩, 韩平. 防止距离Ⅲ段保护因过负荷误动方法的

- 分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 1-7.
- XU Yan, HAN Ping. Analysis and improvement for the scheme to prevent zone III distance protection from incorrect operation caused by non-fault overload[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 1-7.
- [10] 张富超, 钟成元, 张富春, 等. 基于源流路径剖分的输电断面快速搜索[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 8-13.
- ZHANG Fuchao, ZHONG Chengyuan, ZHANG Fuchun, et al. Fast search of transmission section based on path split between sources and flows[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 8-13.
- [11] 徐岩, 郅静. 基于直流潮流和虚拟母线的多控制节点防连锁过载跳闸策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 77-86.
- XU Yan, ZHI Jing. A multi control-node emergency control strategy based on DC power flow and virtual bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 77-86.
- [12] 聂宏展, 袁晓丹, 张会强, 等. 基于多支路开断和关键支路集的快速潮流转移识别[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 38-43.
- NIE Hongzhan, YUAN Xiaodan, ZHANG Huiqiang, et al. Rapid flow transferring identification based on multiple line tripping and key branch set[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 38-43.
- [13] 张龙跃, 肖先勇, 马超, 等. 潮流转移诱导线路触树故障的时间与概率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 64-70.
- ZHANG Longyue, XIAO Xianyong, MA Chao, et al. Prediction of time and probability of line tree-related fault caused by power flow transferring[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 64-70.
- [14] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
- XU Shukai, XIE Xiaorong, XIN Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49.
- [15] 杨奇逊. WAMS 信息在电力系统继电保护中的应用点评[J]. 现代电力, 2006, 23(3): 1.
- YANG Qixun. The application review of WAMS information in power system relay protection[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(3): 1.
- [16] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 7-12, 30.
- YI Jun, ZHOU Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12, 30.
- [17] 徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于潮流转移因子的广域后备保护方案[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 65-71.
- XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. A wide area backup protection scheme based on flow transferring relativity factor[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 65-71.
- [18] 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.
- [19] 金恩淑, 宋晓刚, 董辉, 等. 潮流转移过负荷识别新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 8-12.
- JIN Enshu, SONG Xiaogang, DONG Hui, et al. A new program of flow transferring overload identification[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 8-12.
- [20] 杨文辉, 毕天姝, 黄少锋, 等. 基于电网生存性评估的关键线路识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 29-35.
- YANG Wenhui, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. An approach for critical lines identification based on the survivability of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 29-35.
- [21] 杨文辉, 毕天姝, 薛安成. 潮流转移区域后备保护动作特性自适应调整策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 1-6.
- YANG Wenhui, BI Tianshu, XUE Ancheng. Adaptive strategy for backup protections within power transferring area against cascading trips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 1-6.
- [22] 闫常友, 周孝信. 潮流转移灵敏度以及安全评估指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 7-13.
- YAN Changyou, ZHOU Xiaoxin. Flow transferring sensitivity and security index analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 7-13.

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-05-26

作者简介:

谷松林(1986-), 男, 博士, 主要从事继电保护、电气二次设计方面的研究工作。E-mail: gsl0516@163.com

(编辑 周金梅)