

防止距离 III 段保护因过负荷误动方法的分析与改进

徐岩, 韩平

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 深入研究了防止距离 III 段保护因过负荷误动作的方法——基于转移潮流灵敏度因子的潮流转移识别方案。在归纳转移潮流灵敏度因子矩阵特征的基础上, 指出了该方案仅依靠有功潮流判据可能导致故障和过负荷误判断的缺陷, 深入分析了错误产生的原因。补充了阻抗角附加判据以改善原有方案的性能, 引入潮流转移特征量的概念并应用于提出的改进方案。该方案在发生潮流转移过负荷时能可靠闭锁距离 III 段保护, 有效预防连锁跳闸。对新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真结果验证了改进方案的优越性和实用性。

关键词: 转移潮流灵敏度因子; 过负荷; 误动作; 潮流转移特征量; 距离保护

Analysis and improvement for the scheme to prevent zone III distance protection from incorrect operation caused by non-fault overload

XU Yan, HAN Ping

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Research on the scheme to prevent zone III distance protection from incorrect operation caused by non-fault overload—the power flow transferring identification method based on DC sensitivity factors is carried out. According to the features of transfer power flow sensitivity factors matrix, the disadvantage of this scheme is proposed which may identify incorrectly due to the only criterion of active power when fault occurs. In order to improve its performance, the criterion of impedance angle is put forward. The concept of power flow transferring characteristics (PFTC) is introduced and is applied to the improved flow transferring identification scheme. The improved scheme can identify non-fault overload reliably and block zone III distance protection to prevent cascading trips effectively. The simulation results of IEEE 10-machine 39-bus system have proved its superiority and practicality.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50777016) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 12MS110).

Key words: transfer power flow sensitivity factors; overload; incorrect operation; power flow transferring characteristics; distance protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0001-07

0 引言

继电保护为确保大电网安全发挥着决定性作用。电力系统故障时, 若保护装置正确、快速、可靠动作, 将有效防止事故范围扩大, 保障电网安全可靠运行; 反之, 将可能加速系统崩溃过程, 导致大面积、长时间停电。调查表明: 大停电事故往往引发于电力系统重负荷运行情况下, 某线路发生故

障并被切除后的潮流转移。故障线路被切除后, 其原有潮流将向其他线路转移, 重负荷条件下很有可能导致过载, 此时距离保护 III 段元件一旦动作切除过载线路, 就会加剧潮流转移导致过载范围扩大, 可能引发连锁跳闸造成严重后果。对近几年国内外多次发生的大停电事故^[1-5]调查表明, 大停电事故往往引发于故障线路切除后的潮流转移以及后备保护误动作。如果能识别线路过负荷是故障引起还是潮流转移引起, 就可以正确闭锁距离 III 段保护, 预防连锁跳闸的发生^[6-7]。

文献[8-10]采用基于直流潮流模型的转移潮流

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777016); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS110)

灵敏度因子法估算故障线路切除后网络的有功潮流分布,并将其与实测有功潮流进行比较以判断线路过负荷是否由潮流转移导致。依据电路叠加原理,故障线路切除后的有功潮流分布可看作是故障前的潮流和转移潮流两部分的叠加,利用转移潮流灵敏度因子计算转移潮流,进而得到故障线路切除后网络其余支路的潮流估算值。这种方法是在节点注入功率不变的前提下提出的,只比较有功潮流而忽略了节点无功潮流的改变,若有功率率值接近估算值则闭锁保护,这将导致此种潮流转移识别方法的可靠性受到一定的影响。

本文基于转移潮流灵敏度因子法,深入分析了该方法的不足之处和导致距离 III 段保护误动作的原因,补充了能够提高此种方法可靠性的附加判据,改进了已有的潮流转移识别方案以有效区分过负荷与短路故障,防止距离 III 段保护因过负荷而发生误动。

1 基于直流潮流模型的转移潮流灵敏度因子方法

用于电网潮流计算的直流潮流模型,将非线性潮流问题线性化,分析方便、计算速度快,在大电网线路损耗比重较小时估算的潮流较接近实际值,可以用来估算故障线路切除后的有功潮流分布^[10]。图 1 为转移潮流灵敏度因子法的示意图。图 1 中的 3 机 9 节点系统,图 1(a)为切除支路 L1 前的网络,通过广域测量系统(Wide area measurement system, WAMS)测得的各支路有功潮流分别用 $P_{k,M}$ ($k=1,2,\dots,7$)表示;图 1(b)为切除 L1 后的网络,各支路有功潮流测量值分别用 $P'_{k,M}$ ($k=2,3,\dots,7$)表示;图 1(c)为仅含转移潮流分量的等值网络,该网络中只有一个激励源,与图 1(a)中支路 L1 上原潮流大小相等方向相反, $\Delta P_{k,T}$ ($k=2,3,\dots,7$)为 L1 切除后其余支路的实际转移潮流。

由叠加原理,电网中某支路被切除后其余线路的潮流分布可以通过切除前的潮流与切除后仅含转移潮流分量的等值网络中潮流的叠加来计算。假设切除支路 L1 后网络中其余支路的计算潮流为 $P_{k,E}$ ($k=2,3,\dots,7$)表示,则有

$$P_{k,E} = P_{k,M} + \Delta P_{k,T} \quad (1)$$

由于故障前各支路的潮流可通过 WAMS 测得,因此支路切除后比较其他支路潮流的测量值和估算值即可对过负荷进行识别,判据如下:

$$|P'_{k,M} - P_{k,E}| < \varepsilon |P_{k,E}| \quad (2)$$

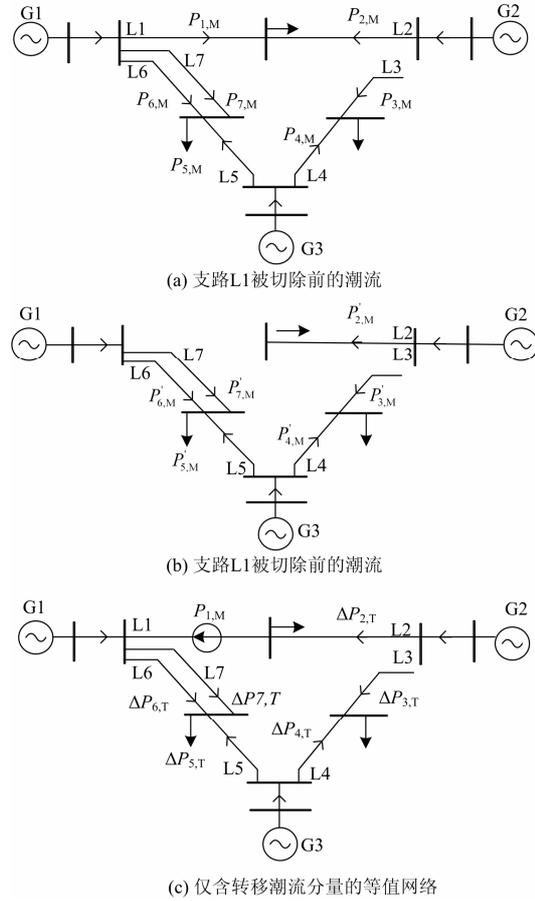


图 1 转移潮流灵敏度因子法示意图

Fig. 1 Method of transfer power flow sensitivity factors

式中, ε 为考虑误差因素后的阈值^[11],可设为 0.1。若满足式(2)则判断为潮流转移过负荷,否则判断为发生故障。

对图 1(c)所示的等值网络,若拓扑结构和网络参数已知,其余支路的转移潮流可认为只与被切除线路故障前的潮流有关,有

$$\Delta P_{k,T} = d_{lk} P_{k,M} \quad (3)$$

式中: d_{lk} 为支路 k 被切除后,支路 k 相对于支路 L1 的转移潮流灵敏度因子,仅与网络参数和拓扑结构有关,可以在故障前通过计算得到。

求得各支路相对其他支路的转移潮流灵敏度因子列向量后可得整个网络的转移潮流灵敏度因子矩阵,如式(4)所示。

$$D_{n \times n} = [d_{lk}] = \begin{bmatrix} -1 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & -1 & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, n 为网络总支路数。

设被切除支路 k 对应的节点分别是 i 和 j , 待求支路 l 对应的节点分别是 m 和 n 。切除支路 k 后其余支路的潮流^[10]可看成往切除前的支路 k 所对应的节点 i 和 j 所在母线分别注入有功潮流 ΔP_i 和 ΔP_j , 并满足 $\Delta P_i = P'_{ij} = -\Delta P_j$ 。 P'_{ij} 为等值网络中支路 k 上的有功潮流, 如图 2 所示。

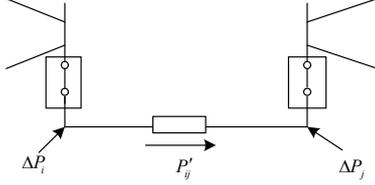


图 2 切除支路 k 后的等值网络

Fig. 2 Equivalent network after line k removed

由直流模型:

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \quad (5)$$

式中: \mathbf{P} 和 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为节点有功注入和电压相角向量; \mathbf{B} 为节点电纳矩阵。求逆可得节点电抗矩阵 \mathbf{X} , 即 $\mathbf{X} = \mathbf{B}^{-1}$, 代入(5)得

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{X}\mathbf{P} \quad (6)$$

令 P_{ij} 表示支路 k 切除前的有功潮流, θ_i 、 θ_j 和 θ'_i 、 θ'_j 分别对应支路 k 切除前和切除后节点 i 、 j 的相角, x_k 为支路 k 的阻抗, 根据式(6)有

$$P_{ij} = (\theta_i - \theta_j) / x_k \quad (7)$$

$$P'_{ij} = (\theta'_i - \theta'_j) / x_k \quad (8)$$

结合式(6)和图 2 等值网络得增量表达式为

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \mathbf{X}\Delta\mathbf{P} \quad (9)$$

式中: $\Delta\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相角增量向量, $\Delta\boldsymbol{\theta} = [\Delta\theta_1 \Delta\theta_2 \cdots \Delta\theta_i \cdots \Delta\theta_j \cdots]^T$; $\Delta\mathbf{P}$ 为节点有功注入增量向量, $\Delta\mathbf{P} = [0 \cdots \Delta P_i \cdots \Delta P_j \ 0 \cdots]^T$ 。

整理得

$$\begin{cases} \Delta\theta_i = X_{ii}\Delta P_i + X_{ij}\Delta P_j \\ \Delta\theta_j = X_{ji}\Delta P_i + X_{jj}\Delta P_j \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta\theta_m = X_{mi}\Delta P_i + X_{mj}\Delta P_j \\ \Delta\theta_n = X_{ni}\Delta P_i + X_{nj}\Delta P_j \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\Delta\theta_i$ 、 $\Delta\theta_j$ 分别表示切除支路 k 后等值网络中节点 i 、 j 电压相角的增量, 满足

$$\begin{cases} \theta'_i = \theta_i + \Delta\theta_i \\ \theta'_j = \theta_j + \Delta\theta_j \end{cases} \quad (12)$$

将 $\Delta P_i = -\Delta P_j$ 代入式(10)得

$$\begin{cases} \Delta\theta_i = (X_{ii} - X_{ij})\Delta P_i \\ \Delta\theta_j = (X_{ji} - X_{jj})\Delta P_i \end{cases} \quad (13)$$

将式(7)、式(12)、式(13)和已知条件 $\Delta P_i = P'_{ij} = -\Delta P_j$ 代入式(8)得

$$P_{ij} = [1 - (X_{ii} + X_{jj} - 2X_{ij}) / x_k] \Delta P_i \quad (14)$$

将 $\Delta P_i = -\Delta P_j$ 代入式(11)得

$$\begin{cases} \Delta\theta_m = (X_{mi} - X_{mj})\Delta P_i \\ \Delta\theta_n = (X_{ni} - X_{nj})\Delta P_i \end{cases} \quad (15)$$

结合前面转移潮流灵敏度因子的计算公式以及推导出的(14)(15), 有

$$d_{lk} = \Delta P_{l,r} / P_{ij} = (\Delta\theta_m - \Delta\theta_n) / (x_l P_{ij}) = (X_{mi} + X_{nj} - X_{mj} - X_{ni}) / [1 - (X_{ii} + X_{jj} - 2X_{ij}) / x_k] \quad (16)$$

式中, x_l 为支路 $L1$ 的阻抗。

2 对转移潮流灵敏度因子法的分析与改进

对式(3)所示的转移潮流灵敏度因子矩阵的特点归纳如下。

1) 转移潮流灵敏度因子反映系统各节点注入功率不变的前提下(这个前提带来的误差将在后面讨论)发生支路切除事件时, 其余支路的被转移潮流量占被切除支路原有有功潮流的比例关系, 它只与网络参数和拓扑结构有关, 不随支路潮流的变化而变化。

2) 网络中其余支路的被转移潮流量不应大于被切除支路原有有功潮流值, 即转移潮流灵敏度因子矩阵中所有元素的绝对值均小于或等于 1, $|d_{lk}| \leq 1$ 。

3) 转移潮流灵敏度因子矩阵的对角元素表示被切除支路相对自身的潮流转移比例, 其值为 -1, 无实际意义。

4) 矩阵列向量表示切除支路编号为列号的支路后, 潮流转移过程中其原有潮流在其他支路上的分配比例, 由能量守恒定律每列元素之和均为 0。

由此可见, 式(1)估算支路有功潮流的前提是节点注入功率不变, 而实际电力系统受到故障扰动时表征系统运行状态的各项电磁参数都会急剧变化^[11], 整个系统从支路切除前的稳态过渡到切除后的稳态必将经历一个电磁暂态和机械暂态交织的复杂过程, 发电机为保证节点电压在允许的范围内会调节注入无功, 负荷从系统吸收的有功和无功将随节点电压的变化而发生改变。对于存在转移潮流的支路, 忽略节点无功的改变, 使得基于转移潮流灵敏度因子的潮流转移识别方案可靠性将有一定程度的降低, 可能发生识别错误, 导致距离 III 段保护闭锁不当扩大事故范围, 可能的情况是短路故障发生在保护区内, 而保护处测得的有功功率与估算值接近。

对于故障支路被切除后发生潮流转移时其余支路有功功率的估算值, 其计算公式如下:

$$P_{1,E} = P_{1,M} + \Delta P_{1,T} = P_{1,M} + (X_{mi} + X_{nj} - X_{mj} - X_{ni}) / [1 - (X_{ii} + X_{jj} - 2X_{ij}) / x_k] P_{k,M} \quad (17)$$

对于故障支路切除后保护区内发生短路故障时的情况, 如图 3 所示。

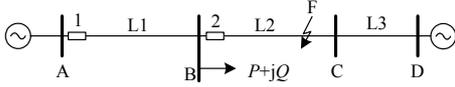


图 3 电力网络示意图

Fig. 3 Power network

假设电网中支路 L2 上发生短路故障, 保护 1 处测得的有功功率可以参考下式来计算:

$$P_{1,M} = U_{M1} I_{M1} \cos(\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})) \quad (18)$$

式中: \dot{U}_{M1} 、 \dot{I}_{M1} 为保护 1 安装处测得的相电压、相电流; $\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})$ 是保护 1 安装处测得的相电压落后相电流的角度。

若式(18)计算的有功功率值与式(17)所得结果接近, 则可能满足判据(2), 判断为发生潮流转移过负荷, 距离 III 段保护被闭锁而无法及时切除故障。保护安装处测得的阻抗角, 在发生短路故障时由于输电线路电抗远远大于电阻, 其测量值比较大, 而超高压线路正常运行时输送的有功功率大于无功功率^[12], 并且负荷往往呈现较强的电阻性, 所以发生潮流转移时测量阻抗值比较小。根据上述特点, 可以增加以下判据提高已有方案的可靠性:

$$\arg(\dot{U}_{Mn} / \dot{I}_{Mn}) < \varphi_{setn}^{III} \quad (19)$$

式中, φ_{setn}^{III} 是保护 n 安装处的阻抗角整定值。

距离 III 段保护起动后, 判据(2)和判据(19)需要相互配合来识别潮流转移过负荷。后面的叙述中将 $(P'_{1,M} - P_{1,E}) / P_{1,E}$ 和 $\arg(\dot{U}_{Mn} / \dot{I}_{Mn})$ 统称为潮流转移特征量 (power flow transferring characteristic, PFTC)。下面讨论 φ_{set1}^{III} 的取值。

根据我国现行的《电力系统安全稳定导则》, 我国电力系统必须能承受的扰动方式为三相短路故障, 因此本文以三相短路故障为例给出阻抗角整定值的设定依据。由图 3, 三相短路故障发生在保护 1 距离 III 段保护末端母线 C 处, 采用极限思想, 设负荷等值阻抗为纯阻性, 其值为 R_L ; 忽略电弧电阻、支路电阻和对地导纳的影响, 设支路 L1、L2 的电抗值为 X_{AB} 、 X_{BC} ; 分支系数 K_b 表示母线 B 流出的电流和保护 1 安装处流过电流的比值。保护 1 安装

处的测量阻抗角为

$$\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1}) = \arg[jX_{AB} + jX_{BC}R_LK_b / (jX_{BC} + R_L)] = \arg[K_bR_LX_{BC}^2 / (R_L^2 + X_{BC}^2) + j(X_{AB}R_L^2 + X_{AB}X_{BC}^2 + K_bX_{BC}R_L^2) / (R_L^2 + X_{BC}^2)] \quad (20)$$

$$\tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})] = (R_LX_{AB} + K_bR_LX_{BC}) / (K_bX_{BC}^2 + X_{AB} / (K_bR_L)) \quad (21)$$

$$\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})] = \frac{2\sqrt{X_{AB}^2 + K_bX_{AB}X_{BC}}}{K_bX_{BC}} \quad (22)$$

式中, 当且仅当 $X_{AB} / (K_bR_L) = (R_LX_{AB} + K_bR_LX_{BC}) / (K_bX_{BC}^2)$ 成立时, $\tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})]$ 取最小值, 记为 $\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})]$ 。

如图 4 所示, 各曲线代表 X_{AB} / X_{BC} 取不同值时 $\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})]$ 随 K_b 变化的趋势。

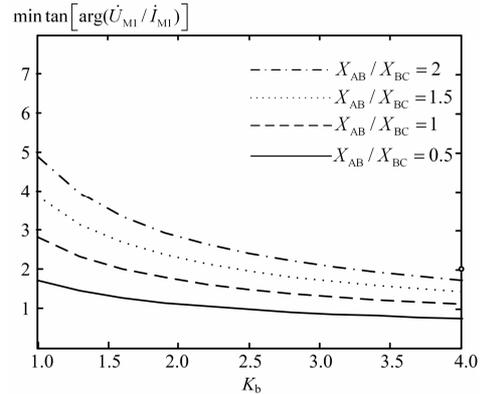


图 4 $\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})] - X_{AB} / X_{BC}$, K_b 曲线

Fig. 4 $\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})] - X_{AB} / X_{BC}$, K_b curves

由图中曲线, X_{AB} / X_{BC} 越小、 K_b 越大时 $\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})]$ 的值越小, 并且当 $K_b = 4$, $X_{AB} / X_{BC} = 0.5$ 时 $\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})] = 0.75$ 。由于 $\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})$ 与 $\min \tan[\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})]$ 的增减性相同, 此时 $\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})$ 也取到最小值, 约为 36.87° , X_{AB} / X_{BC} 增大、 K_b 减小时 $\arg(\dot{U}_{M1} / \dot{I}_{M1})$ 均大于这个值; 再结合发生接地短路故障时可能存在过渡电阻的影响^[13-14], φ_{setn}^{III} 的值可以设为 40° 左右, 也可以根据现场的输电线路以及负荷情况进行计算整定。

3 改进的潮流转移识别方案

制定潮流转移识别方案时需要同时考虑到电力

系统振荡的影响^[15-16]。如图 5 所示, 改进的潮流转移识别方案包括有功潮流和测量阻抗角两方面的判据, 并且配合一段适当的延时。

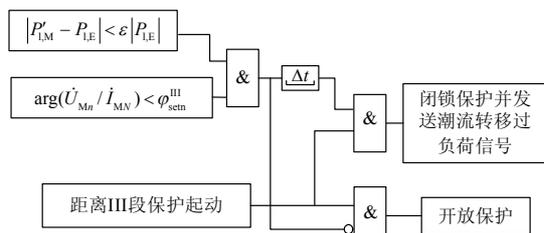


图 5 改进的潮流转移识别方案逻辑图

Fig. 5 Logical diagram of the improved flow transferring identification scheme

若保护区内发生故障, 距离 III 段保护启动后进入潮流转移识别流程, 根据潮流转移特征量 PFTC 的值, 若两个判据均不满足或只满足判据式(2), 判断为发生故障后继续开放保护直到故障被切除; 如果发生潮流转移过负荷, 两个判据同时满足条件, 判断后将可靠闭锁保护并发送过负荷告警信号。闭锁保护前的延时设置可有效避免系统振荡时测量阻抗角进入动作区内导致保护误动作的情况。

改进的潮流转移识别方案采用广域后备保护的集中决策(主站-子站)式结构^[17-19]。主站通过 WAMS 采集的数据对网络拓扑实时跟踪, 结合网络参数通过式(16)计算转移潮流灵敏度因子矩阵, 将支路相关灵敏度因子发送到各区子站处。主站在收到子站保护范围内的断路器跳闸信号后将被切除支路的编号和该支路切除前的有功潮流发送到其他子站处, 各装置经过测量和计算得到 PFTC 后, 根据两个判据配合延时判断出保护启动的原因, 将闭锁信号和分析报告送回主站。主站形成新的潮流转移灵敏度因子矩阵, 对当前系统运行状况进行分析判断, 并采取相应的控制措施。由于距离 III 段保护动作延时一般在 1 s 以上, 因此有足够的实现潮流转移识别功能; 保护的原有功能(到规定时限发跳闸信号)保持不变。经过判断之后, 如果此时有其他故障发生, 并且故障线路被相关保护正确动作跳开, 则新的灵敏度因子矩阵可以再次对其他受影响的线路应用以区分过负荷的性质。

4 仿真验证

本文采用新英格兰 10 机 39 节点系统对改进的潮流转移识别方案进行仿真验证, 如图 6 所示, 支路潮流的参考方向用箭头表示。

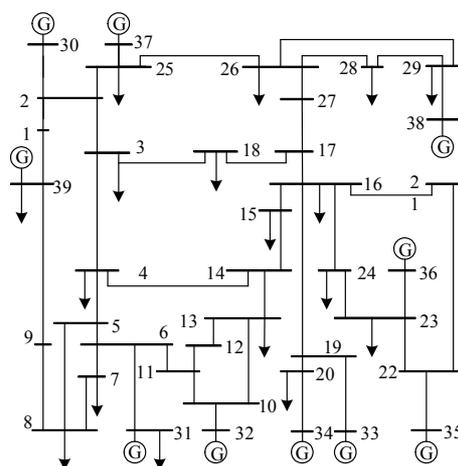


图 6 新英格兰 10 机 39 节点仿真系统

Fig. 6 New England 10-unit 39-bus test system

根据该系统的网络拓扑, 编程计算得到转移潮流灵敏度因子矩阵 $D_{46 \times 46}$ 。支路有功潮流的增加量取决于转移潮流灵敏度因子大小及被切除支路的原有潮流量, 本文结合以上方面选取切除后使剩余支路有功潮流增大较多的支路 2-3 和支路 14-4, 分别进行了支路切除事件仿真, 仿真采用 BPA 软件。切除支路 2-3 和支路 14-4 后各保护装置处的 PFTC 值分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 支路 2-3 切除后的潮流转移特征量

Table 1 Results of PFTC after the removal of branch 2-3

支路编号	2-3	2-1	1-39	18-3
转移潮流灵敏度因子 d_{ik}	-1	0.3546	0.3546	0.5898
有功潮流初始值 P_{LM}	364.6	119.1	118.6	34.2
有功潮流仿真值 P'_{LM}	—	249.6	247.7	247.1
有功潮流估算值 P_{LE}	—	248.39	247.89	249.24
$ (P'_{LM} - P_{LE}) / P_{LE} $	—	0.0049	0.0008	0.0086
测量阻抗角 $\arg(\hat{U}_{Mn} / \hat{I}_{Mn})$	—	4.353°	8.224°	8.833°
支路编号	5-4	17-18	25-26	26-27
转移潮流灵敏度因子 d_{ik}	0.2771	0.5898	0.6454	0.6454
有功潮流初始值 P_{LM}	163.2	192.4	76.7	268.5
有功潮流仿真值 P'_{LM}	267.0	406.3	314.2	503.3
有功潮流估算值 P_{LE}	264.23	407.44	312.01	503.81
$ (P'_{LM} - P_{LE}) / P_{LE} $	0.0105	0.0028	0.0070	0.0010
测量阻抗角 $\arg(\hat{U}_{Mn} / \hat{I}_{Mn})$	8.625°	9.570°	0.474°	9.553°

发生支路切除事件后, 各保护装置进入潮流转移识别流程。支路 2-3 作为系统中发电机输送有功的重要线路, 被切除后主要引起支路 2-1、支路 1-39、支路 18-3、支路 5-4、支路 17-18、支路 25-26 和支路 26-27 上的有功大幅度增加; 同理, 支路 14-4 作为网络中重要的传输线路, 被切除后导致支路 3-4、

表 2 支路 14-4 切除后的潮流转移特征量

Table 2 Results of PFTC after the removal of branch 14-4

支路编号	14-4	3-4	5-4	6-5
转移潮流灵敏度因子 d_{ik}	-1	0.3473	0.6527	0.5933
有功潮流初始值 P_{LM}	262.7	75.1	163.2	481.4
有功潮流仿真值 P'_{LM}	—	167.9	333.7	636.7
有功潮流估算值 P_{LE}	—	166.34	334.66	637.26
$ (P'_{LM} - P_{LE})/P_{LE} $	—	0.0094	0.0029	0.0009
测量阻抗角 $\arg(\dot{U}_{Mn}/\dot{I}_{Mn})$	—	39.742°	5.733°	8.072°
支路编号	11-6	10-11	16-17	17-18
转移潮流灵敏度因子 d_{ik}	0.6570	0.5979	0.3431	0.2763
有功潮流初始值 P_{LM}	344.5	347.2	206.2	192.4
有功潮流仿真值 P'_{LM}	514.8	503	299.2	266.8
有功潮流估算值 P_{LE}	517.09	504.27	296.33	264.98
$ (P'_{LM} - P_{LE})/P_{LE} $	0.0044	0.0025	0.0097	0.0069
测量阻抗角 $\arg(\dot{U}_{Mn}/\dot{I}_{Mn})$	7.076°	11.94°	4.947°	5.651°

支路 5-4、支路 6-5、支路 11-6、支路 10-11、支路 16-17 和支路 17-18 的有功突增较大。这些支路可能发生有功过负荷，特别是潮流转移前的重负荷线路，这时应该有 $|(P'_{LM} - P_{LE})/P_{LE}|$ 小于 0.1 并且 $\arg(\dot{U}_{Mn}/\dot{I}_{Mn})$ 的值小于 40°。根据表 1 和表 2 的 PFTC 数据，发生潮流转移过负荷时，两个判据均满足并符合延时条件，经过识别延时后将可靠闭锁距离 III 段保护，防止其误动作引起连锁跳闸事故；系统振荡时 PFTC 的值到达延时后无法满足识别判据，距离 III 段保护不会被闭锁。

当有故障发生时 $\arg(\dot{U}_{Mn}/\dot{I}_{Mn})$ 的值比较大，比如母线 5 处三相短路故障时母线 7 附近保护处测得的 $\arg(\dot{U}_{Mn}/\dot{I}_{Mn})=79.867^\circ$ ，从而不满足判据式(19)，系统不会因有功潮流测量值与估算值接近而误判断为潮流转移过负荷，在判断为发生故障后将继续开放距离 III 段保护，之后因故障切除而返回或到达动作时限将故障切除。主站收到子站发送的闭锁信号和分析报告后，根据当前网络拓扑和参数形成新的转移潮流灵敏度因子矩阵 $D_{45 \times 45}$ ，以便于此时发生其他故障并被切除后可以再次应用到潮流转移识别流程中去。

5 结语

电力系统故障切除后可能发生较大范围的潮流转移，引起连锁跳闸事故。基于转移潮流灵敏度因子防止距离 III 段保护误动作的方法，其节点注入功率不变的前提可能导致过负荷与故障的识别发生错误。本文在深入分析此方案不足的基础上补充了附加判据，引入 PFTC 的概念并应用于改进的潮流转

移识别方案，仿真验证了改进方案的优越性与可靠性。改进方案不改变保护的原有功能，判据的整定值可以提前设置，也可以根据现场的输电线路以及负荷情况进行设定。进一步的研究可以围绕多支路故障被切除的情况，以及相应的切机、切负荷策略等方面开展。

参考文献

- [1] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8. 14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster — lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [2] 高翔, 庄侃沁, 孙勇. 西欧电网“11. 4”大停电事故的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 25-31.
GAO Xiang, ZHUANG Kanqin, SUN Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE grid on November 4, 2006[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 25-31.
- [3] 陈向宜, 陈允平, 李春艳, 等. 构建大电网安全防御体系——欧洲大停电事故的分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 4-8.
CHEN Xiangyi, CHEN Yunping, LI Chunyan, et al. Constructing wide-area security defensive system in Bulk power grid — a pondering over the large-scale blackout in the European power grid on November 4[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 4-8.
- [4] 项胜, 何怡刚, 吴可汗. 基于分形理论的国内大停电分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 367-371.
XIANG Sheng, HE Yigang, WU Kehan. Blackout analysis of domestic power based on fractal theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 367-371.
- [5] 熊小伏, 陈星田, 郑昌圣, 等. 继电保护系统状态评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 51-58.
XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, ZHENG Changsheng, et al. Overview of research on state evaluation of relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 51-58.
- [6] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 125-130.
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Overview of power system wide area protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 125-130.
- [7] 杨春生, 周步祥, 林楠, 等. 广域保护研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 147-150.

- YANG Chunsheng, ZHOU Buxiang, LIN Nan, et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 147-150.
- [8] 张保会, 姚峰, 周德才, 等. 输电断面安全性保护及其关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 1-7.
- ZHANG Baohui, YAO Feng, ZHOU Decai, et al. Study on security protection of transmission section and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 1-7.
- [9] LIM S I, YUAN H C, RIM S J, et al. Adaptive blinder for distance relay based on sensitivity factors[C] // 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006: 1-5.
- [10] 张亚迪, 陈柏超, 邢海瀛, 等. 基于转移潮流反应灵敏度的新型距离保护算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 35-39.
- ZHANG Yadi, CHEN Bochao, XING Haiying, et al. Algorithm of distance protection based on transfer power flow sensibility[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 35-39.
- [11] 常鲜戎, 赵书强. 电力系统暂态过程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 刘琨, 董新洲, 王宾, 等. 基于本地信息的潮流转移识别[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 80-86.
- LIU Kun, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. Analysis of fault dynamic process impact on flow transferring identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 80-86.
- [13] SARWADE A N, KATTI P K, GHODEKAR J G. Advanced distance relay characteristics suitable for dynamic loading[C] // IPEC, 2010 Conference Proceedings, Singapore: Nanyang Technological University, 2010: 509-514.
- [14] ZADEH H K, LI Z. Adaptive load blinder for distance protection[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(4): 861-867.
- [15] 郭权利. 电力系统低频振荡[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 114-117.
- GUO Quanli. Low frequency oscillation in power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 114-117.
- [16] 李小滨, 刘凯, 陈巨升, 等. 系统振荡时距离保护的对策[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 86-89.
- LI Xiaobin, LIU Kai, CHEN Jusheng, et al. Scheme of the distance protection to avoid mal-operation in swing[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 86-89.
- [17] 何志勤, 张哲, 尹项根. 集中决策式广域后备保护的分区模型与优化算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 212-219.
- HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Partition model and optimization algorithm for wide-area backup protection based on centralized decision-making mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 212-219.
- [18] 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.
- [19] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.
- ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.

收稿日期: 2014-06-30; 修回日期: 2014-07-12

作者简介:

徐岩(1976-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与安全控制、新能源发电与智能电网等;

韩平(1991-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: hanping_1991@sina.com

(编辑 张爱琴)