

基于 WAMS 的潮流转移识别算法

徐慧明, 毕天姝, 黄少锋, 杨奇逊

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京市 102206)

摘要: 针对威胁电网安全运行的连锁跳闸问题, 分析了现有后备保护存在的缺陷, 提出了一种基于广域测量系统的潮流转移识别算法, 引入了用于估算发生潮流转移后电网潮流分布的潮流转移因子的概念, 并给出了严格的定义与计算方法, 提出了可识别潮流转移的广域后备保护方案。在 3 机系统进行了潮流转移仿真, 结果表明该广域后备保护方案具有良好的识别潮流转移能力。

关键词: 潮流转移因子; 广域后备保护; 广域测量系统(WAMS); 电力系统

中图分类号: TM711; TM744

0 引言

继电保护装置作为快速识别并隔离电网中故障元件的关键设备, 在保证电力系统的安全性和可靠性方面起着至关重要的作用。近几十年来若干起世界范围内的大停电事故的调查表明, 大停电事故往往引发于在电力系统重负荷运行并伴随故障的情形下故障线路切除造成的潮流转移。潮流转移可能导致系统中其他线路过负荷, 引发连锁跳闸, 从而使系统运行状况进一步恶化, 甚至发生电网崩溃事故。虽然在大停电事故中, 继电保护按照其整定和配置要求正确动作, 但是由于现有的保护仅利用保护安装处的本地测量信号来达到尽快清除故障元件或不正常运行状态的目的, 而不考虑其动作对系统整体的影响和冲击^[1], 所以它无法区分故障与潮流转移造成的过负荷, 难以阻止线路陆续过载而引起的连锁跳闸事件。因此, 一种以电网整体安全可靠运行为最优目的的广域后备保护的研究迫在眉睫。

近年来, 广域测量系统(WAMS—wide area measurement system)的出现为电力系统保护设计提供了一个全新的思路。WAMS 可以获取全网同步动态信息, 这使得从电网整体最优的角度设计保护成为可能; 并且高速数据传输使得主站的数据更新达到 20 ms~50 ms^[2-4], 这一点对于后备保护尤为重要, 因为其出口延时使得它有足够的时间来获取系统中的同步信息。

文献[5]针对单端电源的情况, 提出基于中心单元和现场单元结构的变电站内快速后备保护的初步设计, 利用对故障电流方向的检测实现对变电站内故障地点的快速判别。文献[6-7]提出用专家系统建立各种不同类型保护的影响因子(AF), 一旦保护

启动以后, 根据所有启动保护的覆盖范围确定初始故障影响区(FAR), 并计算 FAR 内所有元件的 AF 值, 它等于与该元件相关联的所有保护的 AF 值之和, 则 AF 最大的元件诊断为故障元件。文献[8]进一步根据保护启动信息计算保护可信度的大小, 得出断路器的跳闸顺序, 以保证因故障而被切除的元件最少。然而, 网络的拓扑结构越复杂, 专家系统的建立与维护也就越困难; 并且一旦保护启动, 专家系统必定诊断出至少一个故障元件, 不能在潮流转移引起的元件过负荷情况下闭锁后备保护。文献[9-10]提出了基于多点测量信息的广域电流差分后备保护, 终端装置将测量电流传输给保护中心, 在保护中心进行电流差分来判定区内或区外故障; 文献[11]利用基尔霍夫电流定律对保护终端测量的数据进行校核, 来剔除由于通信等因素所导致的错误数据, 并引入跳闸优先权策略来解决保护中心在数据丢失情况下的跳闸次序决策问题。但广域差分后备保护的通信和系统设计都将十分复杂, 难以在大型电网中实现; 并且这些后备保护方案并没有潮流转移的识别能力。

本文提出了一种基于 WAMS 的具有识别潮流转移能力的广域后备保护方案, 引入了用于估算发生潮流转移后电网潮流分布的潮流转移因子(FTRF—flow transferring relativity factor)的概念, 给出了该保护方案实现的流程框图, 对 3 机系统进行了潮流转移的仿真。

1 新型广域后备保护方案

1.1 潮流转移识别判据

电力系统的潮流转移通常发生在网络拓扑结构发生变化之后, 当系统中某条联络线因故障被切除后, 其上的潮流将被转移到系统中其他正常运行的联络线上, 引起正常线路的过载。本文基于故障前

在线实时测量潮流分布和采用 FTRF 来估算故障后的潮流分布,并通过故障后估算潮流与实时测量潮流的比较来判断这些线路的过载是否是由于潮流转移所引起。若发生了潮流转移,就应当在故障前未达到其热稳定极限前正确地闭锁保护,然后采取相应的控制措施。下面以图 1 所示的简单系统为例,说明提出的判据。

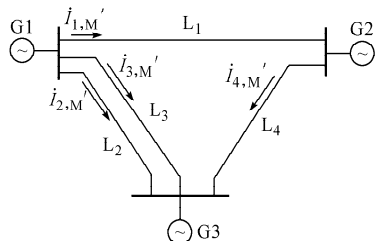


图 1 故障前潮流分布情况
Fig. 1 Pre-fault flow distribution

如图 1 所示,假设线路 L_1 发生故障并被切除。线路 L_1 , L_2 , L_3 和 L_4 的故障前潮流分布可以通过 WAMS 直接获得,进一步可以估算出发生潮流转移后线路 L_2 , L_3 和 L_4 上的潮流分布。比较线路 L_2 , L_3 和 L_4 上的故障后实时潮流分布和估算出的故障后潮流分布,就可以分辨出这些线路上是否发生潮流转移而引起保护动作。

图 1 中线路 L_1 被切除后,其他线路上是否发生潮流转移的识别判据如下:

$$|\dot{i}_{k,M} - \dot{i}_{k,E}| < \epsilon I_{k,E} \quad k = 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中: $\dot{i}_{k,M}$ 为故障后的网络实时测量电流(如图 2 所示); $\dot{i}_{k,E}$ 为故障后的网络估算电流; ϵ 为考虑电网暂态过渡过程和各种误差的阈值。

当不等式成立时,说明故障后的实测潮流与按照潮流转移估算的故障后潮流(如图 2 所示)基本相符,将判断保护的动作为由于潮流转移所引起。其中, ϵ 的取值依据以下原则:①保护安装点母线电压幅值的变化所引起的最大误差;②电网暂态振荡过程中所能引起的最大误差;③保证判据可靠性所需的裕度。

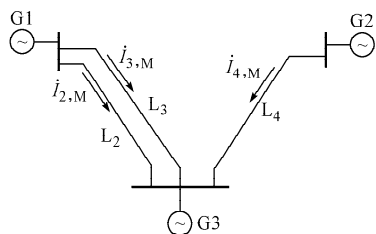


图 2 故障后网络的潮流分布
Fig. 2 Post-fault flow distribution

因此,识别潮流转移的关键就是估算元件切除后系统内的潮流分布。假设线路 L_1 切除前后系统中发电机与负荷节点注入网络的电流不变,根据电路叠加原理,故障切除后的网络潮流可以认为是由故障前的潮流和由线路切除所引起的转移潮流分量 2 部分组成。故障前网络的在线实时测量潮流分布如图 1 所示,而转移潮流分量可以根据图 3 所示的等值网络进行计算。因此,故障后网络的估算电流 $\dot{i}_{k,E}$ 为:

$$\dot{i}_{k,E} = \dot{i}_{k,M}' + \dot{i}_{k,T} \quad (2)$$

式中: $\dot{i}_{k,M}'$ 为故障前在线测量的线路电流; $\dot{i}_{k,T}$ 为线路 L_1 切除后从线路 L_1 向线路 L_k 转移的电流分量(见图 3)。

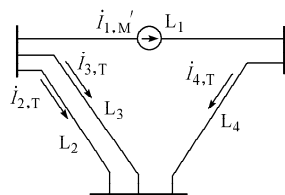


图 3 仅含转移潮流分量的等值网络
Fig. 3 Equivalence network which only contains flow transferring part

如图 3 所示,对于一个拓扑结构和参数已经给定的电力网络,其转移潮流 $\dot{i}_{k,T}$ 可以认为是一个仅与故障前潮流分布 $\dot{i}_{1,M}'$ 相关的变量,而故障前潮流分布可以通过在线测量得到,因此有:

$$\dot{i}_{k,T} = \tau_{k1} \dot{i}_{1,M}' \quad (3)$$

式中: τ_{k1} 为线路 L_1 被切除后线路 L_1 相对于线路 L_k 的 FTRF,其严格定义与计算方法在 1.2 节详细介绍。

将式(3)代入式(2)中,就可以得到网络故障后的估算电流:

$$\dot{i}_{k,E} = \dot{i}_{k,M}' + \tau_{k1} \dot{i}_{1,M}' \quad (4)$$

1.2 潮流转移因子

电力系统的潮流转移通常发生在网络拓扑结构发生变化之后,可见,支路切除造成的潮流转移必然与被切除支路的原有潮流存在一定的内在关系。因此,下面通过数学途径来严格定义 FTRF。

支路的切除可以分为无故障切除过程和发生故障并被切除过程 2 种情况,这 2 种情况下的潮流转移都适用于以下分析方法,在这里统称为支路切除事件。

以 $\dot{i}_{k,M}'$ 表示发生支路切除事件前网络中任一支路 k 的支路电流,以 $\dot{i}_{k,M}$ 表示发生支路切除事件

后网络中任一支路 k 的支路电流。通过 WAMS, 可以直接监测网络在不同时标下的电流分布, 因此发生支路切除事件前后的支路电流 $\dot{I}_{k,M}'$ 和 $\dot{I}_{k,M}$ 都可以直接通过测量得到。

为了介绍 FTRF 的意义, 在此首先引入潮流转移等值网络的概念: 设支路切除事件发生在支路 i 上, 将系统中发电机、负荷注入支路从网络中移去, 再将支路 i 以一个电流源代替, 且该电流源大小等于发生支路切除事件前支路 i 上的电流但方向相反, 变换后得到的子网络被称为原网络发生支路 i 切除事件的潮流转移等值网络。这一变换同样适用于多条支路切除的情况。

对于发生单个支路 i 切除事件的潮流转移等值网络来说, 由于在等值网络(见图 4)中只存在一个激励源 $\dot{I}_{i,M}'$, 根据电路基本原理^[12], 对等值网络中的任一支路 k 来说, 必然存在:

$$G_{ki}(s) = \frac{\dot{I}_{k,T}}{\dot{I}_{i,M}'} \quad (5)$$

式中: $G_{ki}(s)$ 为从支路 i 到支路 k 的电流传递比例函数, 它是一个仅与网络支路参数相关的函数, 与激励源 $\dot{I}_{i,M}'$ 的大小无关; $\dot{I}_{k,T}$ 为发生支路 i 切除事件的潮流转移等值网络中支路 k 的支路电流, 称为潮流转移分量。

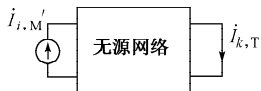


图 4 发生支路 i 切除事件的潮流转移等值网络
Fig. 4 The equivalent circuit of flow transferring with removal of branch i

当不计系统中的电力电子等非线性元件时, 并且由于电网是运行在固定频率下的系统, 网络参数基本为一个恒定的常数, 发生支路 i 切除事件的潮流转移等值网络可以看做在基准频率下运行的一个线性网络。所以, $G_{ki}(s)$ 为一个常数, 潮流转移分量 $\dot{I}_{k,T}$ 与激励源 $\dot{I}_{i,M}'$ 成线性关系。因此, 给出以下定义: 电网中发生支路切除事件后, 被切除支路的原有潮流将按照一定的比例转移到电网中的其他支路上, 将这一比例定义为潮流转移因子, 简称转移因子。支路 i 相对于支路 k 的转移因子用符号 τ_{ki} 表示。

转移因子是一个仅与网络拓扑结构和参数相关的比例系数, 并可以在发生支路切除事件之前计算出来。对于一个拓扑结构和网络参数给定的电网, 可以求出各支路之间的转移因子, 进而得到网络的转移因子矩阵如下:

$$\mathbf{T}_{b \times b} = [\tau_{ki}] = \begin{bmatrix} - & \tau_{12} & \cdots & \tau_{1b} \\ \tau_{21} & - & \cdots & \tau_{2b} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tau_{b1} & \tau_{b2} & \cdots & - \end{bmatrix}$$

式中: “-”表示对角线元素没有意义; b 为原有网络的潮流转移等值网络的支路数。

得到电网的拓扑结构和系统参数后, 一旦网络的运行方式发生变化, 即网络拓扑结构发生变化(这一变动可以根据在线监测电网中断路器的开/合状态得知), 就触发转移因子矩阵重新计算, 得出一个与运行电网相匹配的新的转移因子矩阵。

对于转移因子矩阵中的第 i 列元素, 其计算公式如下:

$$\begin{bmatrix} \tau_{1i} \\ \vdots \\ \tau_{ki} \\ \vdots \\ \tau_{bi} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \mathbf{Y} \mathbf{A}^T \begin{bmatrix} \Delta_{a1} \\ \vdots \\ \Delta_{al} \\ \vdots \\ \Delta_{an} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta_{b1} \\ \vdots \\ \Delta_{bl} \\ \vdots \\ \Delta_{bn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Y}$ 为发生支路 i 切除事件的潮流转移等值网络的支路导纳矩阵; $\mathbf{A}$ 为潮流转移等值网络的关联矩阵; Δ 为发生支路 i 切除事件的潮流转移等值网络的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_n$ ($\mathbf{Y}_n = \mathbf{A} \mathbf{Y} \mathbf{A}^T$) 的行列式; Δ_{al} 为 $\mathbf{Y}_n$ 中第 a 行第 l 列元素的代数余子式; Δ_{bl} 为 $\mathbf{Y}_n$ 中第 b 行第 l 列元素的代数余子式; a 和 b 为支路 i 的关联节点所对应的节点编号。

转移因子矩阵具有以下特点:

1) 所有支路在潮流转移等值网络中应关联在至少一个回路中。对于支路 i 来说, 支路 i 的切除不会破坏网络的连通性; 否则, 支路 i 在转移因子矩阵中所对应的列为无效列。

2) 由于网络中各支路的电抗远大于电阻, 因此转移因子矩阵中的每一项元素的实部都远大于虚部, 且 $|\tau_{ki}|$ 越大, 这一特征越明显。

3) 式(6)是计及支路的电抗、电阻及对地导纳的转移因子计算式。当略去支路对地导纳, 或同时略去支路电阻及对地导纳时, 其计算所得的转移因子矩阵元素与式(6)相差不大, 仅存在较小的误差。

4) 转移因子矩阵的对角线元素没有意义。因为根据转移因子的定义, τ_{ii} 表示支路 i 相对于支路 i 的转移因子, 但这时支路 i 已经被切除, 因此 τ_{ii} 为无意义项。注: 根据式(6)计算出的转移因子矩阵中, 对角线元素均为 0。

1.3 监测与保护策略

由于潮流在网络中的转移是一个涉及到电网中多个元件的问题, 因此本文提出了保护与监测中心(PMC—protection and monitoring center)的概念, 并通过它与分布式的保护装置之间的配合来实

现潮流转移识别功能。

在 PMC 中的潮流转移识别流程如图 5(a) 所示。WAMS 在线监测各支路的电流、电压和断路器触点的开/合信息,并将这些数据送至 PMC。根据断路器的开/合信息,可以在 PMC 中形成网络的整体拓扑结构,并结合网络参数计算出网络的转移因子矩阵。一旦根据当前网络的运行方式形成转移因子矩阵后,PMC 将通过 WAMS 把这些转移因子发送给相应的保护装置(亦即将 τ_{ki} ($i=1,2,\dots,n$) 发送给安装在编号为 k 的支路上的保护装置)。当网络的拓扑结构发生变化,例如某一条支路被切除,这一变化可以通过在线监测该支路对应的断路器触点的开/合状态得知,因而,断路器的状态信号将可以在 $20\text{ ms}\sim 50\text{ ms}$ 内通过 WAMS 被送至 PMC。当 PMC 获知网络拓扑结构的变化时,PMC 将被切除支路的编号以及该支路被切除前的电流值发送到其他支路的保护装置,以激活保护装置中的潮流转移识别判据。各保护装置,在判断出所保护的支路是否发生了因潮流转移引起的保护启动之后,将其判断结果送回给 PMC。如果在网络拓扑结构发生变化之后,潮流转移导致网络中其他支路的保护进入了动作范围,判据将闭锁跳闸信号并向 PMC 发送告警信息;若没有引起其他支路的保护启动,PMC 将根据当前的网络拓扑结构重新形成新的转移因子矩阵。

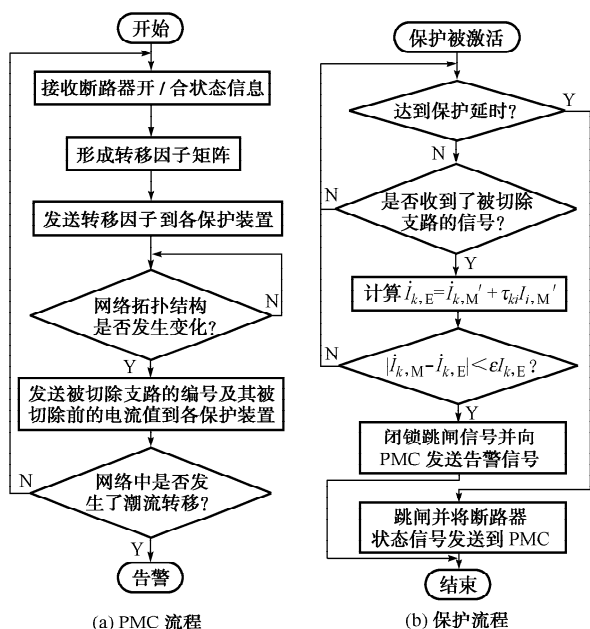


图 5 潮流转移识别流程

Fig. 5 Flow chart of flow transferring identification

各分布在电网中的保护装置收到来自 PMC 的支路切除信息后,潮流转移识别判据将被激活,其保

护流程如图 5(b) 所示。保护启动后,其原有功能依然保持不变,即保护在达到规定的延时之后发出跳闸信号。对后备保护来说,其跳闸延时一般为 0.5 s 以上,因此有足够的时间接收来自 PMC 的信息(信号的传输延时基本在 $20\text{ ms}\sim 50\text{ ms}$)。保护装置一旦收到 PMC 发送的被切除支路编号及其被切除前的电流值,即可计算出网络拓扑发生变化后的估算电流,并进入潮流转移判据。若判据(即式(1))成立,保护将闭锁跳闸信号,以防止正常支路的切除而导致系统情况的进一步恶化;同时,向 PMC 发送支路过载告警信息。若式(1)不成立,将由常规保护来完成支路的保护,并向 PMC 发送信息。

要消除潮流转移引起的支路过载,应将广域后备保护与稳控装置(例如自动切负荷装置)相结合^[13-14],WAMS 的信息共享平台为二者的有机结合提供了十分有利的条件。

2 仿真算例

采用频率 50 Hz 、电压 230 kV 的 3 机 9 节点电网进行仿真,支路的参考电流方向见图 6 中箭头,其故障前支路电流如下: $I_1=174.8\angle -28.51^\circ\text{ A}$, $I_2=171.2\angle -12.00^\circ\text{ A}$, $I_3=171.2\angle -12.00^\circ\text{ A}$, $I_4=83.58\angle -27.61^\circ\text{ A}$, $I_5=125.8\angle -10.04^\circ\text{ A}$, $I_6=164.7\angle -9.703^\circ\text{ A}$, $I_7=146.0\angle -12.82^\circ\text{ A}$ 。

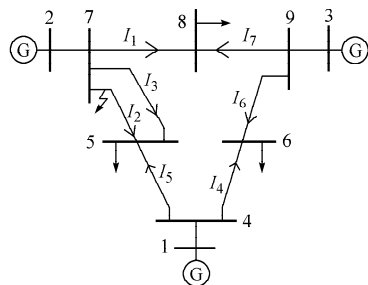


图 6 3 机仿真网络

Fig. 6 Simulation network of three machines

根据网络的参数和拓扑结构,可以计算出网络的转移因子矩阵如下:

$$\Gamma_{7 \times 7} = \begin{bmatrix} - & 0.14 & 0.14 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0.5 & - & 0.86 & -0.5 & 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & 0.86 & - & -0.5 & 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 1 & -0.14 & -0.14 & - & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 0.14 & 0.14 & 1 & - & -1 & 1 \\ -1 & 0.14 & 0.14 & 1 & -1 & - & 1 \\ 1 & -0.14 & -0.14 & -1 & 1 & 1 & - \end{bmatrix}$$

假定第 50 周期时图 6 中支路 2 出口处发生三相短路并在 5 个周期后支路被切除,故障后各支路

电流分布及估算的潮流转移结果如表 1 所示。表中分别列出了系统故障后的支路稳态电流(即 600 周期时的支路电流)、暂态最大电流及出现时刻、根据转移因子的估算电流。其中,支路稳态电流与估算电流之间的误差是由系统节点电压变化导致的。

表 1 故障切除后潮流结果比较
Table 1 Flow transferring result and the estimated ones on post-fault network

电流	暂态最大电流 (出现周期数)	600 周期时 线路电流	估算电流
I_1	237.00 (125)	190.68	198.03
I_3	347.39 (125)	314.34	319.33
I_4	90.66 (84)	54.86	60.33
I_5	178.47 (106)	150.24	149.09
I_6	219.95 (70)	194.96	187.98
I_7	194.27 (63)	131.49	122.74

由表 1 可看出,在故障后切除的网络中,电流最大的 2 条支路分别是支路 1 和支路 3,其电流变化情况如图 7、图 8 所示,其中支路 3 的电流最大。

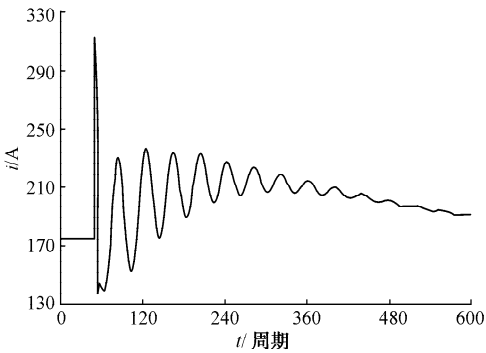


图 7 支路 1 电流变化曲线
Fig. 7 Simulation curve of I_1

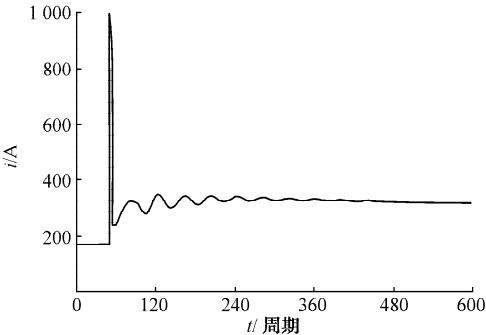


图 8 支路 3 电流变化曲线
Fig. 8 Simulation curve of I_3

对于图 6 所示的网络,充分考虑多次仿真中保护安装点的记录数据和系统故障切除后的暂态过渡过程。式(1)中 ϵ 的取值可选为 30%。图 8 中,支路 3 的故障切除后电流峰值出现在 125 周期,大小为 347.39 A。此时,支路 3 在母线 7 侧的视在阻抗为

392.77 Ω ,已经进入了距离Ⅲ段的动作范围,广域保护装置将启动潮流转移识别程序,根据判据有:
 $|347.39\text{ A}-319.33\text{ A}|<0.3\times319.33\text{ A}$ 。可见,计算结果满足潮流转移判据条件,因此,广域保护装置将发出闭锁信号,从而避免了支路 3 因潮流转移引起的误切除。

3 结语

电力系统故障切除后由于潮流转移很可能会引起连锁跳闸事故发生,将严重影响电力系统的安全可靠运行。本文在分析传统保护装置在潮流转移过程中所存在缺陷的基础上,提出了一种全新的基于 WAMS 的具有识别潮流转移能力的广域后备保护方案,引入了用于估算发生潮流转移后电网潮流分布的 FTRF 的概念,并给出了 FTRF 的严格定义与计算方法。最后,通过对 3 机系统的仿真实验验证了该广域保护方案的可行性。

本文是将 WAMS 引入到潮流转移识别中的第 1 步,如何在判据中引入节点注入电流的变化以及减小判据的暂态误差,并将 FTRF 引入到多支路切除的情形,以及如何采取相应的切机、切负荷控制措施,都是需要进一步研究的课题。

参考文献

[1] XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. Study of wide-area back-up protection for power systems//Proceedings of the International Conference of Electrical Engineering 2005, Jul 10-14, 2005, Kunming, China. 2005.

[2] 胡志祥,谢小荣,肖晋宇,等.广域测量系统的延迟分析及其测试.电力系统自动化,2004,28(15):39-43.

HU Zhixiang, XIE Xiaorong, XIAO jinyu, et al. Analysis and test on delays in the wide area measurement system. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 39-43.

[3] 崔沅,程林,孙元章,等.电力系统实时决策系统中的实时通信.电力系统自动化,2002,26(8):6-10.

CUI Yuan, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Real-time communication in real-time control and analysis system for power systems. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 6-10.

[4] 严登俊,袁洪,高维忠,等.利用以太网和 ATM 技术实现电网运行状态实时监测.电力系统自动化,2003,27(10):67-70.

YAN Dengjun, YUAN Hong, GAO Weizhong, et al. Real-time monitoring system for the states of power network over Ethernet and ATM. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 67-70.

[5] 熊小伏,周家启,赵霞,等.快速后备保护研究.电力系统自动化,2003,27(11):45-47.

XIONG Xiaofu, ZHOU Jiaqi, ZHAO Xia, et al. Research on fast operating backup protection. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 45-47.

[6] TAN J C, CRPSSLEY P A, KIRSCHEN D, et al. An expert

- system for the back-up protection of a transmission network. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 15(2): 508-514.
- [7] TAN J C, CROSSLEY P A, GALE P F, et al. Control of the central sectionaliser in a wide area back-up protection expert system//Proceedings of 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting: Vol 2, Jul 13-17, 2003, Toronto, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 595-600.
- [8] CROSSLEY P A, TAN J C, MCLAREN P G, et al. Sequential tripping strategy for a transmission network back-up protection expert system. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(1): 68-74.
- [9] SERIZAWA Y, MYOUJIN M, KITAMURA K, et al. Wide-area current differential backup protection employing broadband communications and time transfer systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1046-1052.
- [10] SERIZAWA Y, IMAMURA H, KIUCHI M. Performance evaluation of IP-based relay communications for wide-area protection employing external time synchronization//Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 2, Jul 15-19, 2001, Vancouver, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 909-914.
- [11] KANGVANSACHOL K, CROSSLEY P A. Multi-zone differential protection for transmission networks//Proceedings of Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection Vol 2, Apr 5-8, 2004, Amsterdam, Netherlands. Stevenage, UK: IEE, 2004: 428-431.
- [12] 邱关源. 电路:下册. 北京:高等教育出版社,1989.
- QIU Guanyuan. Electric circuit. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [13] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
- ZHAO Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control system to improve the capability of security in the interconnected power network. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6.
- [14] DAMBORG M J, KIM M, HUANG J, et al. Adaptive protection as preventive and emergency control//Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 2, Jul 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1208-1212.
- 徐慧明(1978—),男,博士研究生,研究方向为电力系统保护与控制. E-mail: walker_xu@126.com
- 毕天姝(1973—),女,博士,副教授,研究方向为电力系统保护与控制、人工智能在电力系统中的应用及故障诊断。
- 黄少锋(1958—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统保护。

WAMS Based Flow Transfer Identification Algorithm

XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, YANG Qixun
(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In view of the cascading trip induced by backup relays that affects the safe operation of the system and may even cause blackout, after investigating the defects of the existing backup protection, this paper presents a new wide area backup protection strategy based on WAMS to identify the flow transfer. A new concept of flow transfer relativity factor (FTRF) is proposed to estimate the flow distribution after flow transfer occurs, and the strict definition and calculating method are presented. The simulation in a three-machine network shows that the wide-area backup protection strategy proposed to identify flow transfer works well.

This work is supported by key Project of Chinese Ministry of Education (No. 106052).

Key words: flow transferring relativity factor; wide area backup protection; wide area measurement system (WAMS); power systems

首个北京奥运电力工程项目投产

2006年6月22日,位于北京城北的北京城区首座500 kV变电站竣工投产。城北变电站是电力奥运工程启动后的第1个投产项目,也是首都电网“十一五”规划中新建6座500 kV变电站中的第1座以及首座深入城市中心的500 kV变电站。该工程不仅减少了220 kV进城线路的走廊占用空间,而且节约了宝贵的土地资源 and 建设投资。城北变电站于2005年9月29日开工,建设规模为2组国内容量最大、技术最先进的1200 MVA有载调压变压器。500 kV和220 kV配电装置均采用国际一流的GIS设备,500 kV出线采用同塔双回紧凑型线路,分别与昌平、顺义2座500 kV变电站相连,加之高度计算机化的控制系统,使“科技奥运”这一主题在此得到了充分体现。该项工程建设仅用了不足正常工期一半的时间,创造了同等规模变电站建设速度的全国之最。城北变电站作为首个进入北京城区的500 kV输变电工程,也是保证2008年北京奥运会供电的核心工程,对改善北京电网结构、提高供电可靠性具有重要意义。