双辐射配网主干线光纤网络保护原理研究

以双辐射型全电缆配电网络为对象，基于专用光纤通道，利用基于光纤同步串行的对等通信方式，将有电气连接的相邻开闭所的两路电源进线及对下一级配电所的馈出线的电流在各DTU间同步传送，采用通道延时的相量补偿法实现的数据同步技术、分相式TA饱和闭锁原理及弱馈侧故障判断原理，各DTU根据纵联差动保护的动作原理分别判断前级或后级是否存在区内故障，解决了辐射型网络中上下游电流型保护定值时限难于配合的矛盾，达到了迅速隔离故障和恢复非故障段供电的目的。

何峻[1] 张太勤[2] 姚白雪[3] 王蕾[1]/1. 国网重庆市电力公司市区供电分公司
2. 重庆新世纪电气有限公司 3. 重庆大学电气工程学院

何峻/工程师

关键词/Keywords
双辐射配网·
光纤差动保护·
相量补偿·
TA饱和·
时差法·
弱馈保护·

0 引言

现阶段，我国配电系统中馈线保护主要采用速断和过流保护方式，但由于配网的供电负荷加重，电气距离缩短，馈线往往又被分段开关分成3～5段，这就使得传统的保护在电流定值上很难区分，不得已采用时限配合，大大延迟了故障切除时间，且当馈线某个分段发生故障时，电流保护将整条线路切掉，扩大了停电范围，对保证供电的可靠性非常不利[1]，配电网的故障快速隔离一直是值得研究提高的课题，目前，EPON无源光纤以太网被广泛应用于城区配电自动化通信系统，在此基础上，基于GOOSE通信技术的故障状态量光纤差动保护，可以实现故障链路各支路的故障电流方向、过流保护以及限时电流速断保护启动标志在报文订阅的DTU之间相互传递，达到全线速动的目的。然而，GOOSE虽可以提供对等的信息交换，但对交换机及过程层通信网有较高要求，导致其造价昂贵，不可能在配电网中广泛应用，此方法若依赖于EPON通道实现，EPON通信的稳定性将导致保护的不可靠，而且，DTU间通过GOOSE协议相互传递的以太网报文，在配电网应用中不能保证准确固定的延迟时间影响保护性能的问题还有待研究。为改进这些情况，本文研究了一种针对双辐射配网主干线的光纤网络保护，集成于DTU的站间网络保护装置采用电流相量纵差保护原理，用通道延时的相量补偿法实现数据同步，不依赖通道，并且还针对TA饱和和弱馈侧的保护，提出了相应的措施，可以快速定位、切除故障，实现配电系统快速自愈。

1 电流纵差保护的同步技术

为达到全线速动的目的，采用电流纵差保护原理，差动保护的理论基础是基尔霍夫电流定律，比较的是同一时刻流入流出被保护线路的电流信息，因而线路两端的差动保护装置需要严格对时同步，配电网的差动保护的同步方法有：采样数据修正法、采样时刻调整法、时钟校正法、基于参考矢量同步法和GPS同步法等，前三种方法一般需要采用点对点专用光纤的通信方式，基于参考矢量同步法的前提是已知准确的线路模型，而GPS同步法需要依靠国外技术，面临特殊情况下无法使用的风险，这些同步方法都不具备在配电网中广泛应用的条件[2]。也有文献提出通过插值实现光纤差动保护[3]，但这种方法计算量大，存在方法误差，且不适用于使用包含高次谐波的电量保护，本文的差动保护装置，通过计算通道延时来进行相应的相量补偿，从而实现数据的同步，此种方法简单可靠，不依赖通道，并且可

中国知网 https://www.cnki.net

复用已有光纤。

1.1 计算通道延时

保护装置两端按各自的采样频率进行采样，每次采样完成后都对各电流进行基波的傅里叶变换，得到与采样点一一对应的用实部和虚部表示的电流相量。正常状态下，本保护装置不断计算收到信息和发送信息的时间差$T_m=T_2-T_1$，把它作为采样延迟监测的参数随下次发送的信息一起发送给对侧的保护装置，保护装置将当前的T_m与前次校正误差时记忆的T_{m0}相比较，若两者之差的绝对值大于0.05 ms（电角度0.9°）时，立即启动采样误差计算命令，发出采样误差计算启动报文。

如图1所示，本保护装置在T_0时刻发送报文，对侧保护装置在T_1时刻收到该报文，等到下一个定时发送时刻T_2，计算出$T_m=T_2-T_1$，将T_2、T_m、T_0时间信息发送给本保护装置，本保护装置在T_3时刻收到报文，这样就得到了在专用通道、固定路由条件下基于本保护装置时钟时间T_0、T_3和基于对侧保护装置时钟的T_2以及时间差T_m的通道延时

$$T_R=T_S=(T_3-T_0-T_m)/2 \tag{1}$$

采样延迟误差为

$$\Delta T=T_3-T_R-T_4=0.5\times(T_3+T_0+T_m)-T_4 \tag{2}$$

式中，T_4为本保护装置收到对侧保护装置采样误差校正启动报文前，最近一次发送报文的时刻。$\Delta T>0$说明对侧保护装置滞后于本保护装置采样，$\Delta T<0$说明对侧保护装置超前于本保护装置采样。

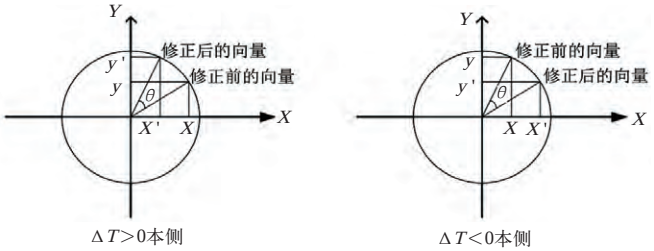

图1 通道延时计算

1.2 相量补偿

本保护装置计算出采样延迟误差后保存下来并立即传给对侧保护装置，同时将自身模拟量时标编号复归为初始编号1，对侧保护装置收到本保护装置发来的采样延迟误差时间后，表示采样延迟误差计算结束，也将模拟量时标复归为初始编号1，两侧将具有相同编号的电流相量进行比较，并且用ΔT对应的θ角进行相量补偿。

如图2所示，令本保护装置收到对侧保护装置的电流相量实部为x，虚部为y，采样延迟误差对应一个θ角，$\theta=2\pi f\Delta T$，f为当前电网频率。

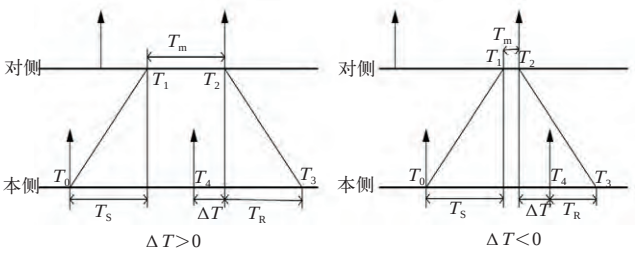

图2 向量修正

$\Delta T>0$时，对侧保护装置采样滞后了一个ΔT，对侧保护装置采样相量应进行正的θ角补偿才能与本保护装置的采样数据进行差动计算，本保护装置的补偿公式为

$$\begin{aligned}x'&=x\cos\theta-y\sin\theta\\y'&=y\cos\theta+x\sin\theta\end{aligned} \tag{3}$$

本保护装置采样相量应进行负的θ角补偿才能与对侧保护装置的采样数据进行差动计算，对侧保护装置的补偿公式为

$$\begin{aligned}x'&=x\cos\theta+y\sin\theta\\y'&=y\cos\theta-x\sin\theta\end{aligned} \tag{4}$$

$\Delta T<0$时，对侧保护装置采样超前了一个ΔT，对侧保护装置采样相量应进行负的θ角补偿才能与本保护装置的采样数据进行差动计算，本保护装置的补偿公式为

$$\begin{aligned}x'&=x\cos\theta+y\sin\theta\\y'&=y\cos\theta-x\sin\theta\end{aligned} \tag{5}$$

本保护装置采样相量应进行正的θ角补偿才能与对侧保护装置的采样数据进行差动计算，对侧保护装置侧的补偿公式为

$$\begin{aligned}x'&=x\cos\theta-y\sin\theta\\y'&=y\cos\theta+x\sin\theta\end{aligned} \tag{6}$$

2 分相式TA饱和闭锁原理

由于差动保护在原理上依靠对被保护设备各端的电流的相量和来区分内、外部故障，因此TA

中国知网 https://www.cnki.net

的变换精度就成为影响保护精度的关键，但传统的TA在线路故障时，常会出现饱和现象，当严重时就可能引起保护在区内故障时延时动作，区外故障时误动作[4]，本文专门针对此种情况，采用分相式差动电流突变量与制动电流突变量的时差判别原理，监测电流互感器饱和状态，在发生配电线路区外故障导致互感器饱和时，保护闭锁，可防止差动保护误动。

在保护满足启动条件（相电流差突变量启动），若差动电流工频变化量判据条件滞后制动电流工频变化量判据条件大于8个采样间隔（即1/4个工频周期），即认为TA饱和，立即闭锁两侧的相差保护160个采样间隔时间（5个周波），如两侧各相电流二次谐波与三次谐波之和与该相基波电流之比均小于整定值（默认15%）再开放相差差动保护，否则差动保护一直闭锁直到比例差动条件返回。以第k个采样点为数据窗终点的差动电流计算

$$I_{\mathrm{cd}\Phi(k)}=\left|\dot{I}_{1\Phi(k)}+\dot{I}_{2\Phi(k)}\right| \tag{7}$$

式中，$\dot{I}_{1\Phi(k)}$、$\dot{I}_{2\Phi(k)}$分别为以第k个采样点为数据窗终点的傅里叶计算后的某相电流相量。以第$k-N$个采样点为数据窗终点的差动电流计算

$$I_{\mathrm{cd}\Phi(k-N)}=\left|\dot{I}_{1\Phi(k-N)}+\dot{I}_{2\Phi(k-N)}\right| \tag{8}$$

以第$k-2N$个采样点为数据窗终点的差动电流计算

$$I_{\mathrm{cd}\Phi(k-2N)}=\left|\dot{I}_{1\Phi(k-2N)}+\dot{I}_{2\Phi(k-2N)}\right| \tag{9}$$

差动电流工频变化量

$$\Delta I_{\mathrm{cd}\Phi(k)}=\left|\dot{I}_{\mathrm{cd}\Phi(k)}-2\dot{I}_{\mathrm{cd}\Phi(k-N)}+\dot{I}_{\mathrm{cd}\Phi(k-2N)}\right| \tag{10}$$

差动电流工频变化量饱和判据条件

$$\Delta I_{\mathrm{cd}\Phi(k)}\geqslant 1.25\Delta I_{\mathrm{cd}N}+I_{\mathrm{QD}}$$
$$\Delta I_{\mathrm{cd}N}=\mathrm{Max}[\Delta i_{\mathrm{cdA}}^{(k-N)},\Delta i_{\mathrm{cdB}}^{(k-N)},\Delta i_{\mathrm{cdC}}^{(k-N)}] \tag{11}$$

式中，I_{QD}一般按0.2倍二次额定电流整定。

以第k个采样点为数据窗终点的制动电流计算

$$I_{\mathrm{zd}\Phi(k)}=\left|\dot{I}_{1\Phi(k)}-\dot{I}_{2\Phi(k)}\right| \tag{12}$$

式中，$\dot{I}_{1\Phi(k)}$、$\dot{I}_{2\Phi(k)}$分别为以第k个采样点为数据窗终点的傅里叶计算后的某相电流相量。

以第$k-N$个采样点为数据窗终点的制动电流计算

$$I_{\mathrm{zd}\Phi(k-N)}=\left|\dot{I}_{1\Phi(k-N)}-\dot{I}_{2\Phi(k-N)}\right| \tag{13}$$

以第$k-2N$个采样点为数据窗终点的制动电流计算

$$I_{\mathrm{zd}\Phi(k-2N)}=\left|\dot{I}_{1\Phi(k-2N)}+\dot{I}_{2\Phi(k-2N)}\right| \tag{14}$$

制动电流工频变化量

$$\Delta I_{\mathrm{zd}\Phi(k)}=\left|\dot{I}_{\mathrm{zd}\Phi(k)}-2\dot{I}_{\mathrm{zd}\Phi(k-N)}+\dot{I}_{\mathrm{zd}\Phi(k-2N)}\right| \tag{15}$$

制动电流工频变化量饱和判据条件

$$\Delta I_{\mathrm{zd}\Phi(k)}\geqslant 1.25\Delta I_{\mathrm{zd}N}+I_{\mathrm{QD}} \tag{16}$$
$$\Delta I_{\mathrm{zd}N}=\mathrm{Max}[\Delta i_{\mathrm{zdA}}^{(k-N)},\Delta i_{\mathrm{zdB}}^{(k-N)},\Delta i_{\mathrm{zdC}}^{(k-N)}] \tag{17}$$

式中，I_{QD}一般按0.2倍二次额定电流整定。

3 弱馈保护

本文主要针对双辐射配网主干线存在弱馈侧，当终端线路发生故障时，保护由于故障特征不明显，正方向元件不能动作从而导致两侧纵联保护都不动作的问题。这时需设置弱馈保护，使弱电源侧电流能够启动装置，保护装置可以进入故障测量程序纵联保护逻辑[5]，本文通过监测正序电压变化判断弱馈侧故障是否启动，自适应判断装置是否处于弱馈侧。如图3所示，相电流突变量、过流均未启动，如果母线正序电压由正常值（正序相电压大于50 V）变为正序相电压小于30 V，或母线正序线电压由正常值（正序线电压大于90 V）变为正序线电压小于50 V，连续两次满足上述该条件，就置弱馈启动标志，保护不满足动作条件200 ms返回，保护满足动作条件，跳闸命令发出后返回。这样可有效满足配电线路各侧运行方式时常改变的运行环境，如果运行方式改变（如本侧改为电源侧运行），不用人工修改定值，弱馈启动条件自动退出即可有效满足条件。

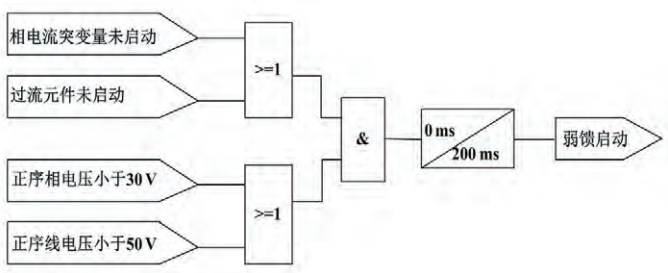

图3 弱馈启动逻辑原理

4 系统配置及实现方案

综上所述，本文要实现的系统配置如图4所

中国知网 https://www.cnki.net

示，各个DTU依据各自时钟定时间间隔对4条支路电流同步采样，通道延时采用相量补偿技术实现前后两个方向共8条支路电流的数据同步。将4个差动保护逻辑元件包含在同一物理装置DTU中，大大节约了装置成本，在实际安装时也大大节省空间，图5显示了保护装置的一体化设计。

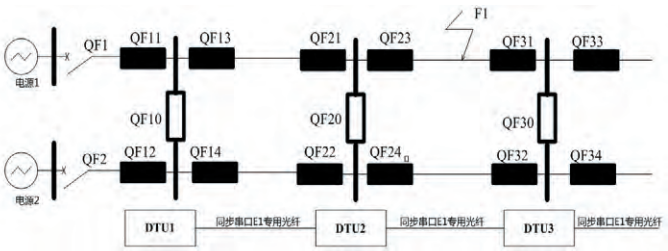

图4 配网故障隔离网络自愈原理图

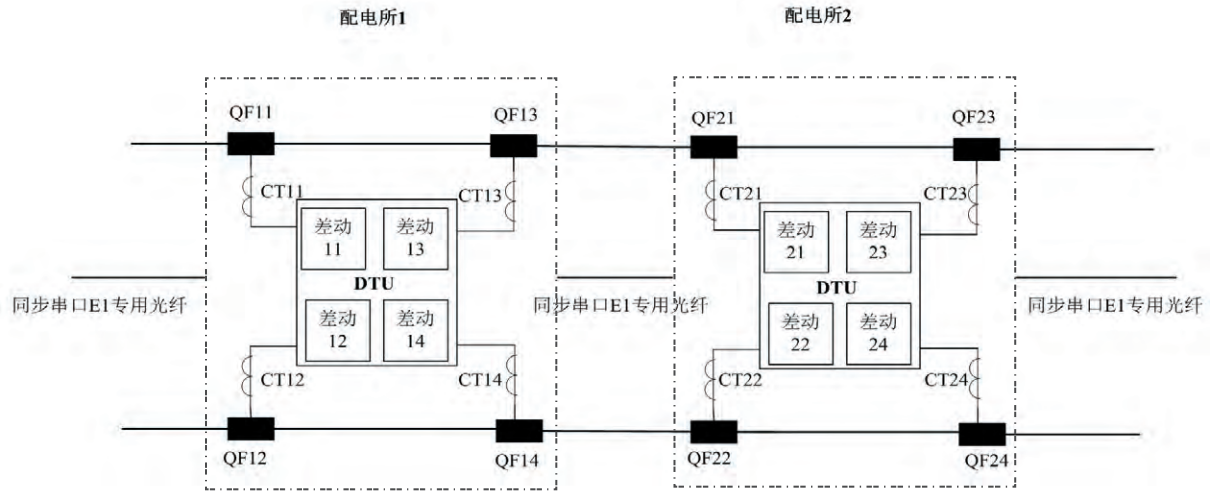

图5 保护装置一体化设计图

5 结束语

目前国内城区骨干型配电网均实现了基于光纤通道的配电自动化系统，一般光纤

通道均留有余量，有利于实现基于光纤通道的网络型电流相量差动保护，复用已有光缆，不增加额外成本，电流相量差动保护采用基于故障相量的数据同步技术，同时，还采用分相式差动电流突变量与制动电流突变量的时差判别原理，防止配电线路区外故障导致互感器饱和而使差动保护误动的情况，增加弱馈启动元件，解决了突变量及电流型启动元件无电源侧无法启动差动保护的问题，适用于双辐射配网主干线，可以达到全线速动的目的。

参考文献

[1] 盛晔，裘愉涛，朱玛，等. 一种适用于配电网的差动保护方法[P]. 中华人民共和国：CN 103050950 A，2013.

[2] 由伟翰. 基于故障信号同步的配网差动保护技术[D]. 济南：山东大学电气工程学院，2009.

[3] 曹团结，尹相根，张哲，等. 通过插值实现光纤差动保护数据同步的研究[J]. 继电器，2006，34(18).

[4] 李岩，陈德树，张哲，等. 鉴别TA饱和的改进时差法研究[J]. 继电器，2001，29(11).

[5] 林浩明.浅谈弱馈保护及其调试方法[J]. 科技创新与应用，2014(20).

（收稿日期：2015－05－26）EA

作者简介

何峻（1978-），男，硕士，工程师，主要研究方向为智能配电网保护与控制。

张太勤（1996-），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为智能配电网保护与控制。

中国知网 https://www.cnki.net