DOI: 10.7667/PSPC171696

电力线路行波差动保护与电流差动保护的比较研究

董新洲，雷傲宇，汤兰西

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系)，北京 100084)

摘要：线路电流差动保护的基础是线路的 RL 集中参数模型和电荷连续性。行波差动保护的基础是线路的分布参数模型和行波传输不变性。针对两类差动保护在电力线路上的应用进行了详细的理论和仿真对比研究。指出二者的根本区别在于行波差动保护考虑了线路的分布参数特性和空间传播特性，而电流差动保护把线路看成节点，完全忽略了分布参数特性和空间传播特性，差动电流是行波差动电流的退化形式。对于特高压长距离输电线路，行波差动保护相比于电流差动保护有明显的性能优势。对于高压和超高压输电线路，行波差动保护和电流差动保护性能无显著差别，电流差动保护可以胜任该类线路。

关键词：继电保护；电力线路；行波差动保护；电流差动保护；分布电容电流

Comparative study of traveling wave differential protection and current differential protection for power lines

DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China)

Abstract: The current differential protection of power lines is based on the RL lumped parameter line model and the principle of charge continuity. The traveling wave differential protection of power lines is based on the distributed parameter line model and the principle of traveling wave transmission invariance. This paper conducts a detailed comparative study on these two types of differential protections for application on power lines from the view of theory and simulation. The essential difference between the above two protections is that the traveling wave differential protection considers the distributed parameter characteristic and the spatial propagation characteristic of a line, whereas the current differential protection regards the line as a node and completely neglects the distributed parameter characteristic and the spatial propagation characteristic of a line. In fact, the differential current is the degradation form of the traveling wave differential current. For UHV long distance transmission lines, the traveling wave differential protection has a superior performance over the current differential protection. For HV and EHV transmission lines, there is no significant performance difference between the traveling wave differential protection and the current differential protection. The current differential protection is qualified for this kind of transmission line.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: relay protection; power lines; traveling wave differential protection; current differential protection; distributed capacitive current

0 引言

电力线路电流差动保护是根据流入被保护线路的总电流判断线路故障的一种保护方法[1]，其基本原理是 RL 集中参数线路模型上的电荷连续性。迄今为止，电流差动保护作为高压和超高压输电线路的主要保护之一，在保障线路安全和电网稳定上发挥了重要作用，但对于特高压长距离输电线路，显著的分布电容电流使得电流差动保护应用受限。

电力线路行波差动保护是根据线路两端行波电流之差判断线路故障的一种保护方法，其基本原理是分布参数线路模型上的行波传输不变性。通过引入

基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFB0900600)

电压量构成行波，并考虑行波的空间传播特性，从根本上解决了线路分布电容电流的问题，行波差动保护是特高压交直流长距离输电线路上的理想选择。

电流差动保护的基本原理由英国学者C.H.Merz和B.Price于1904年提出[2]。最早，电流差动保护主要应用在发电机、变压器、母线和电动机上[3]，随着数字通信技术的发展，电流差动保护越来越多地成为高压和超高压输电线路主保护的最佳选择[4]。相比于过流保护和距离保护，电流差动保护原理简单可靠、具有绝对选择性、动作速度相对较快，而且不受电力系统振荡的影响[5]。随着用电负荷的增长，越来越多的特高压长距离输电线路投入应用[6]，特高压长距离输电线路上存在明显的分布电容电流，使得输电线路整体作为一个节点的假设明显受到破坏，电流差动保护的性能因此受损。为了躲过非区内故障时的分布电容电流，电流差动保护需要提高整定门槛，但这样会造成区内故障时电流差动保护的灵敏性下降。为了消除分布电容电流的不利影响，基于Π型集中参数模型的补偿方法被提出[7-8]，但受限于模型的准确性，这些方法只能补偿稳态电容电流和部分暂态电容电流。

1977年，日本学者Takagi根据无损线的分布参数线路模型提出行波差动保护[9]。分布参数线路模型是从电路的角度描述线路，其数学本质就是波动方程，而波动方程能够描述线路上真实存在的波过程，是行波差动保护的数学基础。由于行波能够描述线路上分布电感和分布电容之间的充放电过程，解释了分布电容电流的产生过程，因此，行波差动保护从原理上就不受分布电容电流的影响。国内在2000年后也对行波差动保护进行了部分研究[10-11]。此外，国内还有基于线路的贝瑞隆模型[12]和Marti模型[13]的电流差动保护被提出，相比于无损线模型，贝瑞隆模型和Marti模型是更加精细的分布参数线路模型，因此这两类电流差动保护方法本质上仍然是基于波动方程的行波差动保护。

需要特别指出的是，目前提出的行波方向保护[14]、行波选线[15]和行波测距[16]普遍只用到故障行波的波头，因此造成行波是暂态高频信号的印象。行波本身是时域信号，其拥有的频带信息完全取决于激励信号和网络。比如，输电线路故障暂态时，故障附加电压源在故障初瞬是阶跃的，但其波形是工频正弦的(因为其大小等于正常运行下故障点处电压值的相反数)，因此将故障行波视为故障附加电源在输电网络上的暂态激励时，就可以知道故障行波不仅具有高频分量，同时具有大量的低频分量(特别是工频分量)，故障行波准确来说是一个全频带的信号。

本文对电流差动保护和行波差动保护进行了详细的理论和仿真对比研究，深刻揭示了电流差动保护和行波差动保护的根本区别，厘清了电流差动保护和行波差动保护应用于电力线路时的优势和局限。

1　电流差动保护与行波差动保护原理比较

1.1　电流差动保护原理

电流差动保护的模型基础是RL集中参数线路模型，因此线路整体可以视为一个节点，只有线路两端存在电流的流入。电流差动保护的理论基础是电荷连续性，因此线路两端流入线路这个节点的电流之和可以识别线路内部是否存在故障。

1.1.1 时域电流差动保护

电气量的时域值是最直观的表示，电力线路电流差动保护的最基本构成方式即是用线路两端时域电流构成差动电流。

$$i_{\mathrm{D}}(t)=\left(i_{\mathrm{m}}(t)+i_{\mathrm{n}}(t)\right) \tag{1}$$

式中：$i_{\mathrm{m}}(t)$和$i_{\mathrm{n}}(t)$分别是线路两侧的时域电流。理论上，区内无故障时，时域差动电流为0；区内有故障时，时域差动电流等于故障支路电流的时域值。因此，通过时域差动电流可以区分区内和区外故障。

实际应用中，时域差动电流在线路区内无故障时不可能完全等于0，因此需要设计制动电流，制动电流的优化设计可以提升电流差动保护的性能[17]。最常见的制动电流形式是一个固定门槛或两端电流之差。

根据附录的仿真模型和算例，220 kV/100 km输电线路在区内故障和区外故障时的时域差动电流如图1所示，可以看到正常运行或区外故障时，时域差动电流非常小，而区内故障后时域差动电流明显增大，可以显著地区分区内故障。

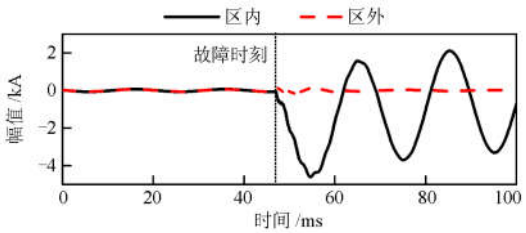


图1　区内和区外故障的时域差动电流

Fig. 1 Time-domain differential currents in the case of internal and external faults

1.1.2 工频相量电流差动保护

时域电流差动保护是电流差动保护的最基本形式，但由于时域差动电流随时间变化，存在较大

波动(特别是在故障暂态)，并且对任何一点噪声误差都极其敏感，使得其可靠性较低。时域电流中的主频分量是工频分量，因此通过估计时域电流中的工频相量，可以构成波动小抗噪声误差的工频相量差动电流：

$$I_{\mathrm{D}}=\left|\dot{I}_{\mathrm{m}}+\dot{I}_{\mathrm{n}}\right| \tag{2}$$

式中，$\dot{I}_{\mathrm{m}}$和$\dot{I}_{\mathrm{n}}$分别是线路两侧的电流工频相量。理论上，区内无故障时，工频相量差动电流为0；区内有故障时，工频相量差动电流等于故障支路电流的工频相量。因此，通过工频相量差动电流可以区分区内和区外故障。

工频相量电流差动保护同样需要设计制动电流来保证保护的安全性和提高其灵敏性。最简单的制动电流是一个固定的门槛值，更加灵活和主流的制动电流形式是两端电流工频相量的绝对值之和或差的绝对值。

根据附录的仿真模型和算例，220 kV/100 km输电线路在区内故障和区外故障时的工频相量差动电流如图2所示，可以看到正常运行或区外故障时，差动电流非常小，而区内故障后差动电流明显增大，可以显著地区分区内故障。

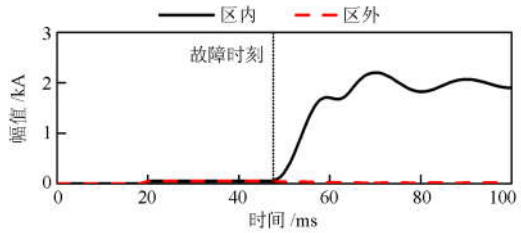


图 2 区内和区外故障的工频相量差动电流

Fig. 2 Power frequency phasors differential currents in the case of internal and external faults

1.2 行波差动保护原理

行波差动保护最基本的模型基础是无损线的分布参数模型，因此线路上存在无衰减传播的行波。行波差动保护的理论基础是行波传输不变性，因此根据线路两端朝同一方向运动的行波之差可以识别线路内部是否存在故障。在此需要说明的是，往参考方向运动的行波是前行波，反向运动的行波是反行波，行波可以分为电压行波和电流行波，行波差动保护一般选择电流行波构成。

1.2.1 时域行波差动保护

类比于电流差动保护，行波差动保护的最基本形式也是由时域值构成。如图 3 所示，对于线路mn，假设参考方向从m端指向n端，以m端保护为例，m端的电流反行波$i_{\mathrm{mr}}(t)$和n端的电流反行波$i_{\mathrm{nr}}(t)$可以由两端的电压和电流求得。

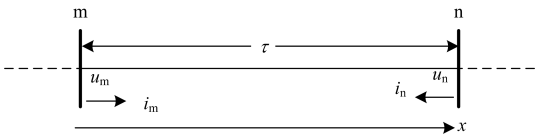


图 3 无损线路行波差动保护示意图

Fig. 3 Diagram of traveling wave differential protection based on lossless line

$$\begin{cases} i_{\mathrm{mr}}(t)=\dfrac{1}{2}\left(-\dfrac{u_{\mathrm{m}}(t)}{Z_{\mathrm{c}}}+i_{\mathrm{m}}(t)\right) \\ i_{\mathrm{nr}}(t)=\dfrac{1}{2}\left(-\dfrac{u_{\mathrm{n}}(t)}{Z_{\mathrm{c}}}-i_{\mathrm{n}}(t)\right) \end{cases} \tag{3}$$

式中：$u_{\mathrm{m}}(t)$和$u_{\mathrm{n}}(t)$为线路两端的时域电压；$i_{\mathrm{m}}(t)$和$i_{\mathrm{n}}(t)$为线路两端的时域电流，两端电流参考方向都是从母线指向被保护线路。时域行波差动电流表示为两端电流反行波之差。

$$\begin{aligned} i_{\mathrm{X}}(t)&=2\left(i_{\mathrm{mr}}(t)-i_{\mathrm{nr}}(t-\tau)\right)= \\ &\left(i_{\mathrm{m}}(t)+i_{\mathrm{n}}(t-\tau)-\frac{1}{Z_{\mathrm{c}}}\left[u_{\mathrm{m}}(t)-u_{\mathrm{n}}(t-\tau)\right]\right) \end{aligned} \tag{4}$$

式中：τ为行波传播线路mn全长的时间；Z_{c}是线路的波阻抗。

$$Z_{\mathrm{c}}=\sqrt{L/C} \tag{5}$$

式中，L和C是线路的单位长度的电感和电容。

理论上，区内无故障时，时域行波差动电流为0；区内有故障时，时域行波差动电流等于故障支路电流的时域值$i_{\mathrm{f}}(t-\tau_{\mathrm{m}})$，其中$\tau_{\mathrm{m}}$为行波从m端传播到故障点f所需的时间。因此，通过时域行波差动电流可以区分区内和区外故障。

实际应用中，时域行波差动电流在区内无故障时不可能完全等于0，因此同样需要设计制动电流，常见的制动电流形式有固定门槛值、两端电流反行波之和的绝对值或三相中行波差动电流最大值[10]。

根据附录的仿真模型和算例，1000 kV/600 km输电线路在区内故障和区外故障时的时域行波差动电流如图4所示，可以看到正常运行或区外故障时，行波差动电流非常小，而区内故障后行波差动电流明显增大，可以显著地区分区内故障。

1.2.2 工频相量行波差动保护

类比于工频相量电流差动保护，通过估计时域电流反行波中的工频相量，得到波动小抗噪声误差的工频相量行波差动电流为

$$I_{\mathrm{X}}=2\left|\dot{I}_{\mathrm{mr}}-\dot{I}_{\mathrm{nf}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau}\right| \tag{6}$$

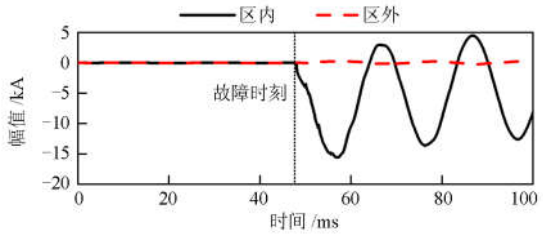


图 4 区内和区外故障的时域行波差动电流

Fig. 4 Time-domain traveling wave differential currents in the case of internal and external faults

实际应用中制动电流的设计类似于工频相量电流差动保护，不过需要以电流反行波为基础构成。

根据附录的仿真模型和算例，仿真得到 1000 kV/600 km 输电线路在区内故障和区外故障时的工频相量行波差动电流如图 5 所示，可以看到正常运行或区外故障时，行波差动电流非常小，而区内故障后行波差动电流明显增大。

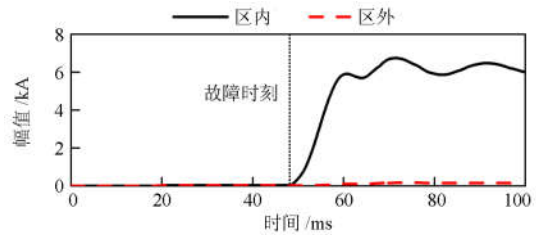


图 5 区内和区外故障的工频相量行波差动电流

Fig. 5 Power frequency phasors traveling wave differential currents in the case of internal and external faults

2 电流差动保护与行波差动保护的根本差别

行波差动保护与电流差动保护的根本区别在于行波差动电流中考虑了两个特征变量：

1) 传输时延 τ

根据电磁场理论，空间中任意一点的电场和磁场都是电磁波在该点的综合作用结果。行波是电磁波在线路上的集中体现，线路上的电压和电流是电场和磁场在线路上的集中体现，因此，线路上任意一点的电压和电流都是由到达该点的所有行波构成。根据分布参数线路模型可以得到波动方程，根据波动方程的通解同样可以得到上述结论，即线路上任意一点的电压和电流都是由前行波集合与反行波集合叠加构成。

无论是在稳态阶段还是暂态阶段，线路上的电压和电流始终由行波构成，而行波传输速度有限，线路两端的电压或电流构成中的某一行波不可能同时到达线路两端，因此，传输时延 τ 体现了行波在线路上的传播特征。

根据附录的仿真模型和算例 2，考虑线路长度(表征了传输时延)的影响，正常运行或区外故障后最大工频相量差动电流和工频相量行波差动电流如表 1 所示。线路越长，传输时延越大，非区内故障时差动电流随传输时延增大而明显增大。由于行波差动保护考虑了传输时延，行波差动电流远小于差动电流。

表 1 不同线路长度(传输时延)，非区内故障时工频相量差动电流和工频相量行波差动电流

Table 1 Power frequency phasors differential current and traveling wave differential current in the case of non-internal faults for different lengths of lines

线路长度/km	差动电流/A	行波差动电流/A
100	256	19
200	517	28
300	782	37
400	1050	41
600	1613	50
3000	3459	42

2) 波阻抗 Z_c

根据波阻抗 Z_c 的计算公式(5)可知，波阻抗 Z_c 是由线路的分布电感和分布电容计算得到。由于分布电感和分布电容的存在，线路上才有充放电过程，进而形成行波，因此行波本质上就是线路上的充放电过程，而波阻抗间接反映了线路上分布电感和分布电容之间的充放电过程，体现了分布电容电流特征。

根据附录的仿真模型和算例 1，考虑电压等级(表征了分布电容电流)的影响，正常运行或区外故障后最大工频相量差动电流和工频相量行波差动电流如表 2 所示。电压等级越高，波阻抗间接反映的分布电容电流越大，非区内故障时差动电流随电压等级增大而明显增大。由于行波差动保护考虑了波阻抗，行波差动电流基本不随电压等级增大而增大。

表 2 不同电压等级(分布电容电流)，非区内故障时工频相量差动电流和工频相量行波差动电流

Table 2 Power frequency phasors differential current and traveling wave differential current in the case of non-internal faults for different voltages of lines

电压等级/kV	差动电流/A	行波差动电流/A
110	19	15
220	48	20
500	125	18
750	184	24
1000	256	20

综上，线路越长，电压等级越高，非区内故障时的差动电流越大，电流差动保护将不得不提高门槛来保证可靠不动作，使得面对区内故障时的灵敏度下降；而行波差动电流在不同电压等级和线路长度时都非常小，行波差动保护将可以采用较低门槛来保证可靠不动作，使得面对区内故障时有足够的灵敏度。电流差动保护认为两端电压和电流在加激励源后是同时建立的，没有考虑传输时延和线路分布电容电流，因此忽略了传输时延 τ 和波阻抗 Z_c 的作用。根据式(4)的行波差动电流表达式可知，当忽略横向的线路分布电容，则波阻抗 Z_c 为无穷大(因为式(5)中 C=0)，式(4)的行波差动电流表达式退化为

$$i_X(t)=\left|i_m(t)+i_n(t-\tau)\right| \tag{7}$$

进一步地忽略传输时延 τ，即 τ=0，式(7)就直接退化为电流差动保护的差动电流形式(参考式(1))。由此得到电流差动保护与行波差动保护的根本区别：电流差动保护是行波差动保护没有考虑传输时延 τ 和波阻抗 Z_c 的简化形式。分布参数线路模型相比于 RL 集中参数线路模型更接近电力线路的本质，因此行波差动保护相比于电流差动保护拥有更合理的理论基础。

3　电流差动保护与行波差动保护性能比较

3.1 线路电压等级和长度的影响

当线路长度较短、电压等级较低时，线路的传输时延和线路上的分布电容电流都较小，使得 RL 集中参数线路模型能够较为准确地描述线路的电气状态，因此电流差动保护可以获得较好的应用。目前，电流差动保护在高压和超高压输电线路上的广泛应用证明了这一点。但对于特高压长距离输电线路，分布电容电流和传输时延已经不能忽略，电流差动保护需要较高的门槛来躲过非区外故障时的差动电流，使得其在面对区内故障时的动作灵敏度明显下降，性能受到极大的削弱。

行波差动保护考虑了线路的传输时延和线路上的分布电容电流，适合作为各种电压等级和线路长度的电力线路的保护，因此在高压、超高压和特高压输电线路上都可以进行应用。但需要注意的是，对于高压和超高压输电线路，由于传输时延和分布电容电流都较小，行波差动保护与电流差动保护相比并没有明显的性能优势。

根据附录的仿真模型和算例，以 220 kV/100 km 输电线路和 1000 kV/600 km 输电线路为例进行对比。区外故障时的工频相量差动电流和工频相量行波差动电流如图 6 所示，区内故障时的工频相量差动电流和工频相量行波差动电流如图 7 所示。

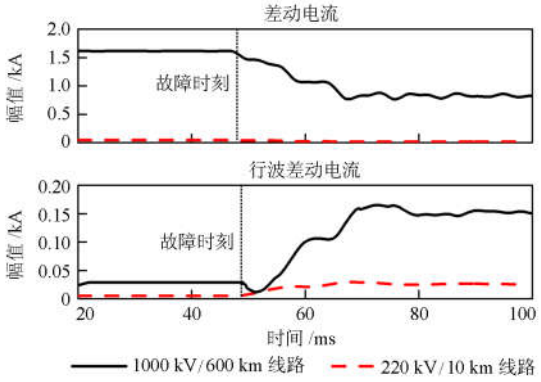


图 6　区外故障时，工频相量差动电流和工频相量行波差动电流的典型比较

Fig. 6 Typical comparison between power frequency phasors differential current and traveling wave differential current in the case of external faults

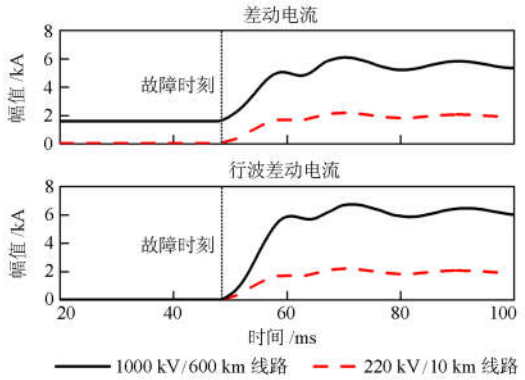


图 7　区内故障时，工频相量差动电流和工频相量行波差动电流的典型比较

Fig. 7 Typical comparison between power frequency phasors differential current and traveling wave differential current in the case of internal faults

在 220 kV 线路上，区内故障后的行波差动电流与差动电流相差不大，正常运行或区外故障后的行波差动电流与差动电流也相差不大，因此可知行波差动保护和电流差动保护在 220 kV 线路上的性能相似。在 1000 kV 线路上，区内故障后的行波差动电流与差动电流相差不大，正常运行或区外故障后的行波差动电流远小于差动电流，使得行波差动保护在 1000 kV 线路上比电流差动保护的性能更好。

3.2 所需电气量

根据差动电流表达式(1)和行波差动电流表达式(4)，电力线路电流差动保护和行波差动保护所需电气量如表 3 所示。

表 3 电流差动保护和行波差动保护所需电气量

Table 3 Quantities needed by current differential protection and traveling wave differential protection

序号	电流差动保护	行波差动保护
1	双端电流	双端电流
2	\	双端电压
3	\	波阻抗
4	\	传输时延

行波差动保护由于需要电压量，相比于电流差动保护通信量增大一倍。此外，电流差动保护不依赖于线路参数，而行波差动保护需要根据线路参数计算波阻抗和传输时延，因此行波差动保护的性能依赖于线路参数的准确性。

3.3 对时间同步的要求不同

电流差动保护和行波差动保护对时间同步的要求如表 4 所示。

表 4 电流差动保护和行波差动保护对时间同步的要求

Table 4 Requirements of current differential protection and traveling wave differential protection for time synchronization

序号	电流差动保护	行波差动保护
1	双端电流同步	双端电流同步
2	\	双端电压同步
4	\	电流和电压同步

行波差动保护由于采用了电压量，使得对时间同步的要求更高，不仅需要双端电流、双端电压的时间同步，还特别需要电流和电压之间的时间同步。

3.4 对互感器传变特性的要求不同

实际应用中，构成保护的电压和电流经过了互感器的传变，由于互感器具有不同的幅频特性和相频特性，因此要实现电流差动保护和行波差动保护，对互感器的传变特性有要求。

电流差动保护只采用两端电流，通过采用同一型号同一批次的电流互感器可以保证电流互感器的传变特性基本一致，因此可以保证两端电流的一致性。而行波差动保护由于同时需要电压和电流，而电压互感器和电流互感器明显具有不同的传变特性，比如在超特高压输电系统上普遍采用的电容式电压互感器的高频传变特性差[18]，无法保证二次侧电压和电流的一致性，因此电流行波计算存在误差，导致出现行波差动电流误差。

3.5 综合性能比较

对于高压和超高压输电线路(电压等级 500 kV 以下，线路长度 300 km 以下)，线路较短使得传输时延较小，电压等级较低使得分布电容电流较小，电流差动保护可以通过合理设置门槛保证保护的安全性和灵敏性，行波差动保护相比于电流差动保护并没有明显的性能优势。考虑到行波差动保护引入了电压量，需要线路参数，使得行波差动保护的应用更复杂，对于高压和超高压输电线路，电流差动保护相比于行波差动保护是更合适的保护方法。

对于特高压长距离输电线路(电压等级 750 kV 以上，线路长度 300 km 以上)，传输时延和分布电容电流较大，电流差动保护需要较高门槛来躲过非区内故障时的差动电流，使得电流差动保护面对区内故障时的动作灵敏度明显下降，行波差动保护相比于电流差动保护有明显的性能优势。所以，在特高压长距离输电线路上，行波差动保护相比于电流差动保护是更合适的保护方法，但需要注意行波差动保护的应用更复杂。

4 结论

本文通过理论分析和仿真算例详细地比较了电力线路上的两类差动保护，行波差动保护和电流差动保护，得出以下结论：

1) 行波差动保护与电流差动保护的根本区别在于是否考虑传输时延和波阻抗。忽略了传输时延和波阻抗的行波差动电流将退化为差动电流。

2) 对于高压和超高压输电线路，行波差动保护相比于电流差动保护并没有明显的性能优势；对于特高压长距离输电线路，行波差动保护相比于电流差动保护有明显的性能优势。

3) 行波差动保护引入了电压量，需要线路参数，相比于电流差动保护，应用更复杂。

附录 A

双端输电系统模型如图 8 所示，差动保护安装在线路 MN 两侧，线路 MN 长度为 l，线路 NQ 长度为 100 km。利用电磁暂态仿真 ATP-EMTP 软件研究了 2 个算例，如表 5 所示，仿真频率为 10 kHz。区内故障 F1 在线路 MN 中点，区外故障 F2 在线路 NQ 中点。

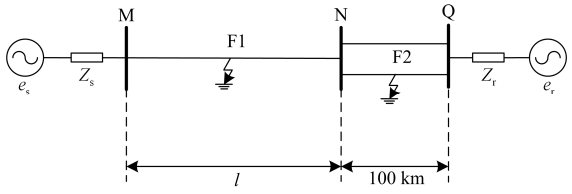


图 8 仿真模型

Fig. 8 Simulation model

线路采用考虑依频特性的 Marti 模型，110 kV、220 kV 和 500 kV 线路的导线和杆塔类型来源于国家电网输电线路通用设计，750 kV 线路的导线和杆塔类型来源于陕西信义-乾县段 750 kV 线路，1000 kV 线路的导线和杆塔类型来源于晋东南-南阳段特高压线路。行波差动保护的仿真以 M 端为例。

表 5 仿真算例

Table 5 Simulation cases

算例	电压等级/kV	线路长度 *l*/km	输送容量/MW
1	110/220/500/750/1000	100	37.5/150/750/1500/3000
2	1000	100/200/400/600/3000	3000

工频相量电流差动保护和行波差动保护的判据构成是基于工频相量的，本文采用全周傅里叶级数算法估计工频相量，全周傅里叶级数算法同时具有滤除直流分量、谐波分量和估计工频相量的能力。

参考文献

[1] SHAH K R, CALABRESE C, TUDOR J R. Propagation of fault generated surges on overhead transmission lines[J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(1): 176-178.

[2] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[3] 林湘宁, 何战虎, 刘世明, 等. 复式电流比例差动保护判据的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 98-102.
LIN Xiangning, HE Zhanhu, LIU Shiming, et al. Reliability evaluations on complex current percentage differential criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 98-102.

[4] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

[5] 李保恩, 马拥军, 李海峰, 等. 光纤差动保护的应用研究及现场试验[J]. 继电器, 2003, 31(7): 73-76.
LI Baoen, MA Yongjun, LI Haifeng, et al. The application research of optic-fiber differential protection and site test[J]. Relay, 2003, 31(7): 73-76.

[6] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.

[7] 吴通华, 郑玉平, 朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 61-67.
WU Tonghua, ZHENG Yuping, ZHU Xiaotong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 61-67.

[8] 索南加乐, 张怿宁, 齐军, 等. Π 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.
SUONAN Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on II-model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.

[9] TAKAGI T, BABA J, UEMURA K, et al. Fault protection based on travelling wave theory-part I: theory[C] // IEEE PES Summer Meeting, Mexico City, 1977, 77: 750-753.

[10] 张武军, 何奔腾. 行波差动保护不平衡差流分析及实用方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 49-55.
ZHANG Wujun, HE Benteng. Analysis and application of unbalanced differential current in traveling-wave differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 49-55.

[11] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 基于小波变换的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 25-29, 35.
SU Bin, DONG Xinzhou, SUN Yuanzhang. Traveling wave differential protection based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 25-29, 35.

[12] 郭征, 贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 1-5.
GUO Zheng, HE Jiali. Novel principle of pilot differential relay protection of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.

[13] 阎俏, 陈青. 基于 Marti 模型的电流差动保护原理[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 51-55.
YAN Qiao, CHEN Qing. The principle of current differential relay protection based on the Marti model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 51-55.

[14] 张冰, 赵书强, 甄永赞. 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16):

58-63.

ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan. Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 58-63.

[15] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析和接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 1-6.

DONG Xinzhou, BI Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.

[16] 李振兴, 吴李群, 田斌, 等. 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 16-22.

LI Zhenxing, WU Liqun, TIAN Bin, et al. Single-terminal traveling wave location algorithm based on amending wave velocity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 16-22.

[17] 王秀莲, 胡广, 毕大强. 光伏低电压穿越期间无功补偿对差动保护灵敏度的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 51-56.

WANG Xiulian, HU Guang, BI Daqiang. Impact analysis of reactive power compensation on sensitivity of differential protection during the low voltage ride-through of photovoltaic systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 51-56.

[18] BISWAL M, BISWAL S. A positive-sequence current based directional relaying approach for CCVT subsidence transient condition[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 81-91. DOI 10.1186/s41601-017-0038-0.

收稿日期：2017-12-04

作者简介：

董新洲(1963—)，男，教授，博导，IEEE Fellow，IET Fellow，中国电机工程学会高级会员，主要研究方向为电力系统继电保护；E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn

雷傲宇(1990—)，男，博士研究生，主要研究方向为输电线路行波差动保护；E-mail: lay13@mails.tsinghua.edu.cn

汤兰西(1991—)，男，博士研究生，主要研究方向为柔性直流输电线路保护。

(编辑 周金梅)