

基于故障分量的有功功率极性比较式纵联保护

刘 星¹, 黄家凯², 高厚磊², 樊占峰¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 根据故障附加网络中有功功率的极性特征, 提出了基于故障分量的有功功率极性比较式纵联保护原理。其主要思想是: 发生内部故障时, 附加网络中线路两端有功功率的极性相同; 外部故障时两端有功功率的极性相反; 正、反向出口处故障时不存在死区问题。借助 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件, 搭建 500 kV 输电线路模型, 对所提方案的动作性能进行了仿真和验证。在此基础上, 进一步对比分析了分相保护方案 and 三相保护方案, 并提出了基于故障分量有功功率幅值特征的选相方法。理论分析和仿真结果表明, 所提方案能够正确判别区内、外不同类型的故障, 抗过渡电阻能力较强, 出口故障无死区, 两端数据无需严格同步, 且不受无功因素影响。

关键词: 故障分量; 有功功率; 极性比较; 故障选相; 输电线路; 故障分析

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.031

0 引言

输电线路构成了电力系统的骨架, 对电力系统的重要性不言而喻。为可靠、迅速地切除线路上的故障, 各类保护算法已被应用到输电线路中。其中, 电流差动、相位差动等纵联保护原理已得到广泛应用, 但其性能易受对地电容、无功补偿装置等因素的影响^[1-3], 且对数据同步性有很高的要求^[4], 需要相应的电容电流补偿方案及可靠的同步装置和通道。

文献[1-3]为电力系统提供了电容电流的自适应补偿方案、基于 II 模型的时域补偿方案和实时补偿方案等多种可行方法。文献[4]为电流差动保护设计了基于全球定位系统(GPS)的数据同步方案, 文献[5-6]则利用北斗卫星系统进一步提高了我国电力系统的时钟可靠性。

方向纵联保护对数据的同步性要求不高, 但易受功率倒向等因素的影响, 存在因闭锁信号或允许信号延时配合失当导致误动的风险^[7-8]。文献[7]和文献[8]均结合具体的故障实例深入分析了功率倒向引起保护误动的原因, 并通过调整信号展宽和逻辑配合来应对此类问题。

此后, 专家学者依据能量守恒定律提出了基于有功功率的保护方案, 有效地避免了无功因素的影响, 可应用于长距离输电线路甚至是电缆线路。文献[9-11]将有功差动方案应用到输电线路和母线之中并对其动作特性进行了分析, 验证了此类方案的可行性。但值得注意的是, 近区金属性故障时的电压或功率因数均接近于 0, 导致有功差动保护存在死区问题^[9]。为应对此缺陷, 文献[12]将无功功率引入有

功判据来提高保护的适应能力, 而文献[13]则通过设置电压门槛, 将有功差动保护专用于输电线路高阻接地保护。

考虑到有功差动保护的优势及缺陷, 并结合故障分量的特征, 本文利用故障附加网络中有功功率的极性特征来区分内部故障和外部故障, 提出了基于故障分量的有功功率极性比较式纵联保护方案。为验证所提纵联保护方案的可行性和动作性能, 本文搭建了 500 kV 输电系统模型, 针对不同故障类型、不同故障位置、允许过渡电阻能力、非同步数据影响、无功因素影响、出口金属性故障等不同运行状况进行了大量的数字仿真及分析; 然后, 本文对分相极性比较方案和三相极性比较方案进行了对比分析, 并通过分析故障相和非故障相有功量的幅值差异, 提出了相应的选相方法。

1 基于故障分量的有功极性比较原理

1.1 故障附加网络中有功功率极性特征

输电线路发生故障后, 可根据叠加原理从故障网络中分解出相应的故障附加网络^[14]。双端供电的输电线路发生区外和区内故障时, 相应的故障网络和故障附加网络分别如图 1(a)和(b)、(c)所示。

根据图 1 可以看出, 故障网络与故障附加网络的结构具有相似性: 当故障点位于被保护线路外部的点 k_1 时, 故障附加网络中的虚拟电源 ΔE_{k1} 同样位于线路外部, 如图 1(b)所示; 当故障点位于被保护线路内部的点 k_2 时, 故障附加网络中的虚拟电源 ΔE_{k2} 同样位于线路内部, 如图 1(c)所示。

按图 1 中的参考方向, 发生区外故障时, 图 1(b)中的虚拟电源 ΔE_{k1} 输出的有功功率贯穿线路, M 端与 N 端的有功功率值为一正一负, 二者极性相反; 发

收稿日期: 2016-10-11; 修回日期: 2017-11-02

基金项目: 许继集团有限公司科技项目(SGTYHT/14-JS-190)
Project supported by the Science and Technology Project of Xuji Group Corporation(SGTYHT/14-JS-190)

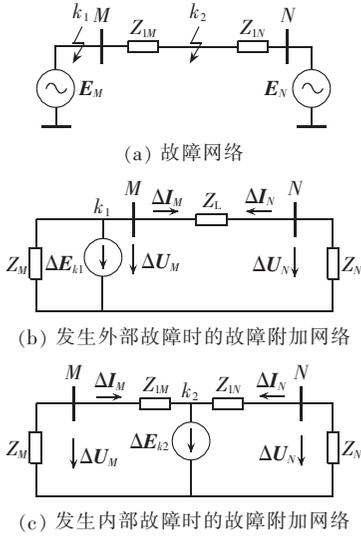


图 1 故障网络与故障附加网络

Fig.1 Fault network and fault additional network

生区内故障时,图 1(c)中由虚拟电源 ΔE_{k2} 向 M 端和 N 端输出的有功功率同时为负,具有相同的极性。

1.2 保护判据

根据上文所述故障附加网络中有功功率的极性关系,构建如式(1) — (3)所示的动作判据。

$$\text{sign}(P') = \begin{cases} 1 & P' > P_{\text{op}0} \\ 0 & |P'| < P_{\text{op}0} \\ -1 & P' < -P_{\text{op}0} \end{cases} \quad (1)$$

$$F_f = \text{sign}(P'_M) \times \text{sign}(P'_N) \quad (2)$$

$$\text{故障区间} = \begin{cases} \text{区内故障} & F_f = 1 \\ \text{区外故障} & F_f \neq 1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, P'_M 、 P'_N 分别为故障附加网络中,流过线路 M 端、 N 端的有功功率,其值均由量测点处的电压、电流故障分量计算而来; $P_{\text{op}0}$ 为保护的最小动作限值,用于防止正常运行时保护误动,可根据正常电流波动的最大值和变压器抽头正常调整引起的电压波动进行整定,并乘以适当的可靠系数; $\text{sign}(P'_M)$ 、 $\text{sign}(P'_N)$ 分别为 P'_M 和 P'_N 的极性; F_f 为故障区间的标志,当其值为 1 时,表明故障点位于保护区内。

发生内部故障时, M 端与 N 端有功功率的流向相同, P'_M 和 P'_N 的极性相同,因此 $F_f = 1$, 判别结果为区内故障; 发生外部故障时, P'_M 和 P'_N 的极性相反,此时 $F_f = -1$, 判别结果为区外故障; 线路正常运行时,电压、电流的故障分量及相应的有功功率均接近于 0, 保护不启动。

根据故障附加网络中有功量的极性特征对故障区间进行辨识,即为本文所述保护判据的基本原理。

1.3 有功功率的计算

故障附加网络中有功功率 P' 的计算如式(4)或式(5)所示,计算时均使用了电压、电流的故障分量。

$$P' = \Delta U \Delta I \cos \varphi' \quad (4)$$

$$P' = \frac{1}{S} \sum_{i=0}^{S-1} \Delta u(i) \Delta i(i) \quad (5)$$

其中, ΔU 、 ΔI 分别为电压、电流故障分量的有效值; φ' 为量测点处电压、电流故障分量间的相位差,其值取决于量测点背侧的等值系统阻抗或线路阻抗,不受过渡电阻影响,发生金属性故障时 $\cos \varphi'$ 不为 0; $\Delta u(i)$ 、 $\Delta i(i)$ 分别为电压、电流故障分量的瞬时值; S 为每周周期采样点数。

由式(4)计算得到的有功功率为基波有功功率,计算时首先经滤波过程得到工频故障分量的有效值和相位,滤波的精度与响应速度直接影响到计算耗时。式(5)未经滤波过程,直接由离散数据参与运算。与式(4)相比,式(5)的计算结果中还包含直流分量和部分高频分量产生的有功功率,但其计算速度存在明显的优势。电力系统发生故障后可能产生明显的直流分量和高频分量,因此建议采用式(4)或经滤波器后采用式(5)计算单相有功功率,三相有功功率之和即为流过 M 端或 N 端的总有功功率。

式(4)和式(5)均利用电压、电流的故障分量计算有功,因此可以沿袭故障分量的特点:

- a. 不反映系统正常运行状态,不受负荷状况影响;
- b. 故障点处的电压故障分量的幅值最高,发生近区金属性接地时不存在电压死区;
- c. 量测点处功率因数只受系统阻抗或线路阻抗影响,发生金属性故障时可保证功率因数不为 0^[15]。

2 仿真验证及性能分析

2.1 故障仿真及分析

借助 PSCAD 电磁暂态仿真软件,本文搭建了如图 2 所示的模型,模拟各类故障并借助 MATLAB 软件对仿真数据进行处理。其中,线路输电线路为四分裂架空线路,使用贝瑞隆分布参数,长度为 300 km, M 、 N 端的正序系统阻抗分别为 $Z_{M1} = 8.47 + j48.02 \Omega$ 、 $Z_{N1} = 7.82 + j44.34 \Omega$, M 、 N 端的零序系统阻抗分别为 $Z_{M0} = 6.98 + j39.59 \Omega$ 、 $Z_{N0} = 6.95 + j39.39 \Omega$, 线路的正、零序阻抗分别为 $Z_1 = 0.0275 + j0.423 \Omega$ 、 $Z_0 = 0.0825 + j1.35 \Omega$ 。

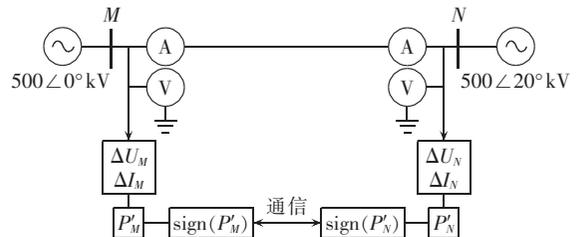


图 2 仿真模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of simulation model

调整故障元件,在被保护线路不同位置(M 端、 N 端正向出口处,距离 M 端 100 km、150 km、200 km 处, M 端、 N 端反向出口处)模拟 A 相接地故障、BC 相间故障和 ABC 三相故障,对故障数据进行提取及处

理,部分仿真结果如表 1—3 所示。

表 1 为被保护线路内部不同位置发生金属性故障时的仿真结果。由表 1 可见,对于不同类型、不同位置的内部故障,本文方案均能正确判断故障区间。

表 2 为被保护线路外部发生金属性故障时的仿真结果,可以看出,发生外部故障时的仿真结果与前文分析一致,即被保护线路两端有功功率的极性相反, F_f 均为 -1,判别结果为区外故障。

表 3 为被保护线路 100 km 处 A 相经不同过渡电阻接地及 BC 相间经不同过渡电阻短路时的仿真结果,可以看出,随着过渡电阻的增加,基于故障分

量的有功量的幅值逐渐减小,但依然能够保持极性特征,从而使保护可正确判别故障区间。

2.2 无功装置投切的影响

基于有功功率的保护方案不受无功因素影响,可用于长距离输电线路甚至是电缆线路。本文所提保护方案利用故障附加网络中有功功率的极性特征构成判据,同样能够避免线路无功状况的影响,投切电容器、电抗器等无功元件时保护所受影响很小。

在线路模型的中间位置添加无功元件,当投入或切除 50、100、150、200 Mvar 的电容器或电抗器时,引起的基于故障分量的有功功率如图 3 所示。

表 1 发生内部金属性故障仿真结果

Table 1 Simulative results under internal metallic faults

故障类型	故障位置	P'_M/MW	P'_N/MW	$\text{sign}(P'_M)$	$\text{sign}(P'_N)$	F_f	判别结果
A 相 接地	M 端正向出口	-311.7	-39.5	-1	-1	1	区内故障
	$l=100$ km	-103.5	-51.2	-1	-1	1	区内故障
	$l=150$ km	-68.5	-68.7	-1	-1	1	区内故障
	$l=200$ km	-50.4	-103.3	-1	-1	1	区内故障
	N 端正向出口	-38.2	-314.0	-1	-1	1	区内故障
BC 相间 短路	M 端正向出口	-396.6	-71.4	-1	-1	1	区内故障
	$l=100$ km	-203.9	-113.1	-1	-1	1	区内故障
	$l=150$ km	-149.1	-149.9	-1	-1	1	区内故障
	$l=200$ km	-113.8	-208.6	-1	-1	1	区内故障
	N 端正向出口	-73.3	-425.2	-1	-1	1	区内故障
ABC 三相 短路	M 端正向出口	-870.1	-158.5	-1	-1	1	区内故障
	$l=100$ km	-446.8	-249.1	-1	-1	1	区内故障
	$l=150$ km	-326.3	-328.5	-1	-1	1	区内故障
	$l=200$ km	-248.6	-453.9	-1	-1	1	区内故障
	N 端正向出口	-159.3	-913.9	-1	-1	1	区内故障

表 2 外部金属性故障仿真结果

Table 2 Simulative results under external metallic faults

故障类型	故障位置	P'_M/MW	P'_N/MW	$\text{sign}(P'_M)$	$\text{sign}(P'_N)$	F_f	判别结果
A 相 接地	M 端反向出口	84.9	-39.9	1	-1	-1	区外故障
	N 端反向出口	-38.3	78.7	-1	1	-1	区外故障
BC 相间 短路	M 端反向出口	112.5	-66.4	1	-1	-1	区外故障
	N 端反向出口	-68.2	113.9	-1	1	-1	区外故障
ABC 三相短路	M 端反向出口	263.7	-147.7	1	-1	-1	区外故障
	N 端反向出口	-148.1	255.0	-1	1	-1	区外故障

表 3 不同过渡电阻下的仿真结果

Table 3 Simulative results under different transition resistances

故障类型	过渡电阻/ Ω	P'_M/MW	P'_N/MW	$\text{sign}(P'_M)$	$\text{sign}(P'_N)$	F_f	判别结果
A 相 接地	0	-103.5	-51.2	-1	-1	1	区内故障
	5	-90.1	-44.6	-1	-1	1	区内故障
	10	-81.0	-40.1	-1	-1	1	区内故障
	50	-40.9	-20.2	-1	-1	1	区内故障
	100	-17.7	-8.7	-1	-1	1	区内故障
	150	-9.3	-4.6	-1	-1	1	区内故障
	200	-5.6	-2.8	-1	-1	1	区内故障
	250	-3.8	-1.8	-1	-1	1	区内故障
	300	-2.6	-1.3	-1	-1	1	区内故障
BC 相间 短路	0	-203.9	-113.1	-1	-1	1	区内故障
	5	-199.9	-110.9	-1	-1	1	区内故障
	10	-194.3	-107.9	-1	-1	1	区内故障
	50	-135.6	-75.4	-1	-1	1	区内故障
	100	-77.1	-42.9	-1	-1	1	区内故障

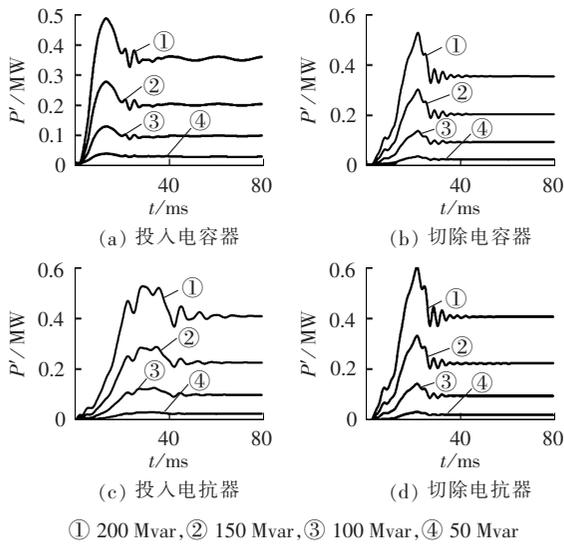


图 3 无功元件投切的影响

Fig.3 Influence of switching reactive elements

投切电容器、电抗器等无功元件时,会引起电流相位和线路无功的明显变化,进而影响电流差动保护、距离保护、相位差动保护等的性能,但对基于有功功率的保护方案影响较小。图 3 中,因无功元件投切而产生的有功功率波动的最大值为 0.6 MW 左右,而实际应用中无功元件的调整则遵循一定的控制策略,调整过程更为平滑^[16],采用较低的动作门槛就能够可靠地避免投切无功元件的影响。

2.3 数据不同步影响

被保护线路无故障时,电压、电流故障分量及相应有功量均接近于 0,不受数据同步状况影响。线路发生故障时,电压、电流发生突变产生了故障分量和相应的有功量。受暂态过程影响,该有功量值存在波动,但其极性特征能够保持不变,为直流量,不会因同步问题导致保护误动或拒动。

以 N 端为基准对 M 端数据进行调整,得到两端数据同步和 M 端滞后 N 端 22.5°、45°、90° 情况下,发生外部故障时 P'_M 和 P'_N 的波形及相应的极性如图 4 所示。由图可见,数据不同步导致了两端波形错位,但两端的极性比较结果并未受到影响,不会引起保护误动或拒动。此外也能够看出,数据不同步给保护的动作用带来了一定的延时。

3 保护方案设置

3.1 分相极性比较

线路发生故障时,任意故障相线路均会呈现出前文所述的极性特征,即:某相线路发生内部故障时,基于该相电压、电流故障分量的 M 端有功量与 N 端有功量具有相同的极性;该相线路发生外部故障时,基于该相电压、电流故障分量的两端有功量具有相反的极性。因此,本文所述保护方案可按相设置,

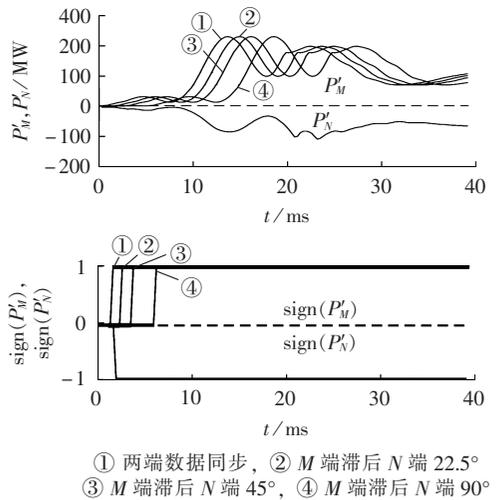


图 4 数据不同步的影响

Fig.4 Influence of data asynchronization

即构成分相极性比较式纵联保护方案,可在不增加选相元件的条件下实现单相跳闸。实现该方案时,需要通道分别传送各相有功量的极性信息。

需要注意的是,按相构成极性比较时,非故障相线路会通过互感与故障相线路交换功率^[17],可能呈现出故障特征。为避免此种影响,可适当提高式(1)中的动作限值 P_{00} ,躲过故障相的影响以提高保护可靠性,但会降低保护的灵敏性。

3.2 三相极性比较

前文仿真及分析中,构成判据的极性信息均为故障附加网络中 M 端或 N 端三相总有功量的极性,即 ABC 三相有功功率之和的极性。由三相总有功量的极性构成判据时,本文所述保护方案不具备故障选相功能,不能给出分相跳闸信号。若要实现单相重合闸,需增设额外的故障选相元件。实现三相极性比较方案时,两端保护装置之间需交换的信息量是分相比较方案的 1/3。

3.3 故障相别选择方法

使用三相总有功量极性信息构成保护判据时,需额外进行故障选相才能按相给出跳闸信号。本文将简要分析故障相和健全相中基于故障分量的有功量的幅值差异,并给出相应的选相方案。根据图 2 所示模型,M 端量测点处三相电压、电流的故障分量分别如式(6)和式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{MA} \\ \Delta I_{MB} \\ \Delta I_{MC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 I_0 \\ c_1 I_1 \\ c_2 I_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{MA} \\ \Delta U_{MB} \\ \Delta U_{MC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{M0} & Z_{M1} & Z_{M2} \\ Z_{M0} & \alpha^2 Z_{M1} & \alpha Z_{M2} \\ Z_{M0} & \alpha Z_{M1} & \alpha^2 Z_{M2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 I_0 \\ c_1 I_1 \\ c_2 I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\alpha = e^{j120^\circ}$, 为矢量旋转因子; I_0, I_1, I_2 分别为故障点处故障电流的零序、正序和负序分量; c_0, c_1, c_2 分

别为零序、正序和负序电流分布系数; ΔI_{MA} 、 ΔI_{MB} 、 ΔI_{MC} 分别为M端量测点处A、B、C相电流的故障分量; ΔU_{MA} 、 ΔU_{MB} 、 ΔU_{MC} 分别为M端量测点处A、B、C相电压的故障分量; Z_{M0} 、 Z_{M1} 、 Z_{M2} 分别为M端系统的零序、正序和负序等值阻抗。

长距离输电线路中,可近似认为系统的正、负序电流分布系数及正、负序阻抗参数相等^[16],因此有 $c_1=c_2$ 、 $Z_{M1}=Z_{M2}$ 。下文简要分析不同类型的故障。

a. 发生BC相间短路故障时,故障点处有边界条件: $I_1+I_2=0$ 、 $I_0=0$ 。整理式(6)和式(7),可得到:

$$\begin{cases} \Delta I_{MA}=0 \\ \Delta I_{MB}=(\alpha^2-\alpha)c_1 I_1 \\ \Delta I_{MC}=(\alpha-\alpha^2)c_1 I_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{MA}=0 \\ \Delta U_{MB}=(\alpha^2-\alpha)c_1 Z_{M1} I_1 \\ \Delta U_{MC}=(\alpha-\alpha^2)c_1 Z_{M1} I_1 \end{cases} \quad (9)$$

取各序电流分布系数为实数,则基于电压、电流故障分量的各相有功量如式(10)所示。

$$\begin{cases} |P'_{MA}|=0 \\ |P'_{MB}|=\frac{3}{2}c_1^2 R_1 |I_1|^2 \\ |P'_{MC}|=\frac{3}{2}c_1^2 R_1 |I_1|^2 \end{cases} \quad (10)$$

b. 发生A相接地故障时,故障点处有边界条件: $I_0=I_1=I_2$ 。整理式(6)、(7),计算各相有功量见式(11)。

$$\begin{cases} |P'_{MA}|=\frac{1}{2}(c_0+2c_1)(c_0 R_0+2c_1 R_1)|I_1|^2 \\ |P'_{MB}|=\frac{1}{2}(c_0-c_1)(c_0 R_0-c_1 R_1)|I_1|^2 \\ |P'_{MC}|=\frac{1}{2}(c_0-c_1)(c_0 R_0-c_1 R_1)|I_1|^2 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} |P'_{MA}|=|P'_{MB}|+\frac{3}{2}(c_1^2 R_1+c_0 c_1 R_1+c_0 c_1 R_0)|I_1|^2 > |P'_{MB}| \\ |P'_{MA}|=|P'_{MC}|+\frac{3}{2}(c_1^2 R_1+c_0 c_1 R_1+c_0 c_1 R_0)|I_1|^2 > |P'_{MC}| \end{cases} \quad (12)$$

c. 发生三相故障时,有边界条件: $I_0=I_2=0$ 。整理式(6)和式(7),得到各相有功量值如式(13)所示。

$$|P'_{MA}|=|P'_{MB}|=|P'_{MC}|=c_1^2 R_1 |I_1|^2 / 2 \quad (13)$$

其中, P'_{MA} 、 P'_{MB} 、 P'_{MC} 分别为故障附加网络中,M端基于故障分量的A、B、C相有功量; R_0 、 R_1 、 R_2 分别为M端系统的零序、正序和负序等值电阻。

从式(10)~(13)中可以看出:发生单相故障或两相故障时,故障相的故障分量及相应有功量的幅值均明显大于非故障相;发生三相故障时,由各相故障分量计算得到的有功量幅值相近。因此,根据三相有功量的幅值差异,可对故障相进行甄别。

根据有功量的幅值差异进行选相时,若某两相功率量的幅值均大于另一相,则认为这两相存在故障;

若某相功率量的幅值远大于其他两相,且其他两相有功量的幅值相近,则认为该相发生单相故障;否则判断为三相故障。

表4为距M端100 km处发生各类故障时,根据各相有功量幅值差异进行选相的结果。从表中可以看出:A相发生故障时,BC两相有功量的幅值均远小于A相,且B相与C相有功量的幅值相近;发生BC相间短路故障时,A相有功量的幅值远小于B、C相,且B、C相有功量的幅值相近;发生BC两相接地故障时,A相有功量的幅值远小于BC两相,但由于零序参数与正、负序参数存在较大差异,B、C相的有功量并不完全相等;发生ABC三相短路故障时,三相有功量均具有明显的幅值且大小相近。表4表明,本文所述方案可正确选出故障相。

表4 故障选相

Table 4 Fault phase selection

故障类型	P'_{MA}/MW	P'_{MB}/MW	P'_{MC}/MW	选相结果
A相接地	-69.30	0.033	0.033	A相
BC相间短路	-0.00005	-90.40	-90.40	BC相
BC两相接地	0.025	-58.46	-117.48	BC相
ABC三相短路	-100.33	-100.44	-100.39	三相

4 结论

本文基于故障附加网络中有功功率的极性特征,提出了基于故障分量的有功功率极性比较式纵联保护方案并通过数字仿真进行了性能验证。该方案在充分分析有功差动保护和方向纵联保护优、缺点的基础上,引入故障分量进行取长补短,具有不受负荷状况影响、不存在电压死区、不受无功因素影响、允许过渡电阻能力强等优点;在利用通道实现该方案时无需线路两端数据严格同步、数据交换量少,且不需两端允许信号或闭锁信号相配合,不受功率倒向影响。此方案可作为现有纵联保护理论的补充,对改善保护性能具有参考价值。

参考文献:

- [1] 桑丙玉,王晓茹. 特高压长线路电流差动保护自适应电容电流补偿方法[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8):1-5.
SANG Bingyu,WANG Xiaoru. Adaptive compensation scheme of capacitance current to differential protection in UHV lines[J]. Power System Protection and Control,2010,38(8):1-5.
- [2] 臧怀泉,林飞,荣雅君,等. 带并联电抗器的时域电容电流补偿算法[J]. 高电压技术,2016,42(12):3964-3971.
ZANG Huaiquan,LIN Feifei,RONG Yajun,et al. Time-domain capacitance current compensation algorithm with shunt reactors [J]. High Voltage Engineering,2016,42(12):3964-3971.
- [3] 索南加乐,张泽宁,齐军,等. II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 com-

- pensating algorithm on Π -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(5):12-18.
- [4] 高厚磊,江世芳,贺家李. 基于 GPS 的电流纵差保护设计及试验[J]. 电力系统自动化,2001,25(21):61-65.
GAO Houlei,JIANG Shifang,HE Jiali. Design and testing of GPS based current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(21):61-65.
- [5] 张帆,梁昕. 电力全网时间同步系统组网思路探讨[J]. 广东电力,2015,28(1):31-35.
ZHANG Fan,LIANG Xin. Discussion on networking thinking of time synchronization system of electric power whole network[J]. Guangdong Electric Power,2015,28(1):31-35.
- [6] 陈孟元,陈跃东. 基于高精度晶振同步北斗 1pps 的同步相量测量装置时钟源[J]. 电力自动化设备,2011,31(9):111-114.
CHEN Mengyuan,CHEN Yuedong. Beidou 1pps corrected by high precision crystal oscillator for PMU[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(9):111-114.
- [7] 汪洋,陈久林. 纵联零序方向保护误动原因分析及其对策[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):122-125.
WANG Ping,CHEN Jiulin. Analysis of longitudinal zero sequence direction protection misoperation and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(7):122-125.
- [8] 杨光亮,郝能灵,郑晓冬,等. 多馈入高压直流输电系统中功率倒向问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):22-27.
YANG Guangliang,TAI Nengling,ZHENG Xiaodong,et al. Power converse in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):22-27.
- [9] NAMDARI F,JAMALI S,CROSSLEY P A. Power differential protection as primary protection of transmission lines and bus-bars[C]//Iet,International Conference on Developments in Power Systems Protection. Glasgow,UK:IET,2008:80-85.
- [10] DARWISH H A,TAALAB A M I,AHMED E S. Investigation of power differential concept for line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):617-624.
- [11] AZIZ M M A,ZOBAA A F,IBRAHIM D K,et al. Transmission lines differential protection based on the energy conservation law [J]. Electric Power Systems Research,2008,78(11):1865-1872.
- [12] TAALAB A M I,DARWISH H A,AHMED E S. Performance of power differential relay with adaptive setting for line protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(1):50-58.
- [13] 姜宪国,王增平,张执超,等. 基于过渡电阻有功功率的单相高阻接地保护[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13):187-193.
JIANG Xianguo,WANG Zengping,ZHANG Zhichao,et al. Single-phase high-resistance fault protection based on active power of transition resistance[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(13):187-193.
- [14] 陈德树,尹项根,张哲,等. 故障分量差动保护与故障变化量差动保护[J]. 电力系统自动化,2008,32(9):39-41.
CHEN Deshu,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Fault component differential protection and fault variation component differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(9):39-41.
- [15] 黄家凯,高厚磊,彭放,等. 输电线路虚拟有功功率差动保护[J]. 电力系统自动化,2017,41(14):190-196.
HUANG Jiakai,GAO Houlei,PENG Fang,et al. Virtual active power differential protection for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(14):190-196.
- [16] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003:102.
- [17] 吴麟琳,黄少锋. 零序互感对相邻线路纵联零序方向保护的影响[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(3):24-28.
WU Linlin,HUANG Shaofeng. Effects of zero-sequence mutual inductance on zero-sequence pilot protection of parallel lines [J]. Power System Protection and Control,2011,39(3):24-28.

作者简介:



刘 星

刘 星(1972—),男,山东济宁人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:13938918099@139.com);

黄家凯(1992—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:hjk1026@sina.cn);

高厚磊(1963—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统保护与控制、数字化变电站(**E-mail**:houleig@sdu.edu.cn)。

Active power polarity comparison pilot protection based on fault components

LIU Xing¹,HUANG Jiakai²,GAO Houlei²,FAN Zhanfeng¹

(1. Xuji Group Corporation,Xuchang 461000,China;

2. School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061,China)

Abstract: According to the polarity characteristic of active power in fault additional networks,an active power polarity comparison pilot protection principle based on fault components is proposed. The main idea of the proposed principle is that the active power at both ends of fault additional network has same polarities under internal faults and opposite polarities under external faults,and there is no dead zone under forward and backward outlet faults. With the help of PSCAD/EMTDC electromagnetic simulation software,a model of 500 kV transmission lines is built for the simulation and verification of operating performance of the proposed scheme,based on which,the split-phase protection scheme and the three-phase protection scheme are compared and analyzed,and a fault phase selection method based on the active power amplitude characteristic of fault components is proposed. Theoretical analysis and simulative results show that the proposed scheme can correctly identify internal and external faults,and immune to reactive power factor,it has great capability against transition resistance with no dead zone under outlet fault and do not need strict synchronization.

Key words: fault components; active power; polarity comparison; fault phase selection; power transmission line; failure analysis