

DOI: 10.7667/PSPC171670

基于电压相量平面的单相高阻接地保护方案

赵志仁¹, 马伟², 丁冬², 王昀昀³, 刘友元⁴, 林森², 景琦⁵

(1. 杭州市城市建设投资集团有限公司, 浙江 杭州 310009; 2. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310009; 3. 华北电力大学, 北京 102206; 4. 国网湖南省电力有限公司怀化供电公司, 湖南 怀化 418000; 5. 国网陕西省电力有限公司西安供电公司, 陕西 西安 712000)

摘要: 针对经过渡电阻发生单相接地故障时电流差动保护灵敏性降低的问题, 提出了一种基于电压相量平面的单相高阻接地保护方案。首先, 利用保护安装处的序电流与故障点电流相位近似相等的特点, 计算线路两端电流的夹角。然后, 通过对线路两端电流的夹角实测值与计算值求取差值, 得到单相接地保护相角差。最后, 根据单相接地保护相角差在区内故障与区外故障的差异, 构造了单相高阻接地故障的动作判据。基于 PSCAD/EMTDC 的仿真结果表明, 该方案不受故障相别、过渡电阻、故障位置、运行工况等因素影响, 能够准确地反映保护区内与区外故障, 且具有很高的灵敏性和可靠性, 可作为电流差动保护的有效补充。

关键词: 输电线路; 电压相量平面; 单相接地; 后备保护; 过渡电阻

Vector diagram of voltage based single-phase high-resistance grounding fault protection scheme

ZHAO Zhiren¹, MA Wei², DING Dong², WANG Yunyun³, LIU Youyuan⁴, LIN Sen², JING Qi⁵

(1. Hangzhou City Construction Investment Group Limited, Hangzhou 310009, China; 2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. State Grid Huaihua Power Supply Company, Huaihua 418000, China; 5. State Grid Xi'an Power Supply Company, Xi'an 712000, China)

Abstract: In view of the problem that the sensitivity of current differential protection decreases when a single-phase grounding fault occurs via transition resistance, a single-phase high-resistance grounding backup protection scheme based on voltage phasor plane is proposed. Firstly, by using the characteristic that the sequence current phase of protection installation point is approximately equal to the one of fault point, the angle between the currents of two ends of the line is calculated. Then, the phase angle difference of single-phase ground protection is obtained by calculating the difference between the measured value and calculated value of the angle between the currents of two ends of the line. Finally, based on the difference between internal and external fault in phase angle difference of single-phase grounding protection, the operating criterion of single-phase high-resistance grounding fault is presented. Simulation results based on PSCAD/EMTDC show that the scheme is immune to the fault phase, transition resistance, fault location, operating condition and other factors. It can accurately reflect internal-fault or external-fault with high sensitivity and reliability, which can be used as an effective supplement of current differential protection.

This work is supported by Science and Tecnology Project of State Grid Coporation of China (No. 521104170012).

Key words: transmission line; vector diagram of voltage; single-phase grounding; backup protection; transition resistance

0 引言

基于基尔霍夫电流定律的电流差动保护原理简单、可靠性高、动作速度快, 被广泛作为输电线路的主保护^[1-3]。然而, 面对电力系统中最常见的单相

接地故障^[4-5], 过渡电阻的存在会导致电流差动保护灵敏性降低, 甚至拒动^[6-7]。

针对电流差动保护灵敏性受过渡电阻影响的问题, 专家学者提出了多种解决方案, 主要有两种思路: 1) 根据故障后电流量信息反映的系统状态自适应调整保护动作特性^[8-9], 提升了保护判据的灵敏性, 但对数据同步性要求高。2) 引入系统故障后的

电压量信息, 利用故障后序分量特性构造保护判据^[10-13], 或利用过渡电阻自身的故障特征构造保护判据^[14-15], 可靠性更高, 且对数据同步性要求低, 但发生电压互感器(Potential Transformer, PT)断线时将失效。

鉴于电压相量平面能够定量、定性地反映输电线路的故障特征, 很适合于继电保护分析^[16-17], 提出了一种基于电压相量平面的单相高阻接地保护方案。首先, 利用保护安装处的序电流与故障点电流相位近似相等的特点, 计算线路两端电流的夹角; 然后, 通过对线路两端电流的夹角实测值与计算值求取差值, 得到单相接地保护相角差; 最后, 根据单相接地保护相角差在区内故障与区外故障的差异, 构造了单相高阻接地故障的保护判据。基于PSCAD/EMTDC 的仿真结果验证了本方案的有效性与可行性。

1 基本原理

以图 1 所示系统为例, 母线 M 侧和 N 侧的系统电压分别为 \dot{E}_M 和 \dot{E}_N , 等值阻抗分别为 Z_M 和 Z_N 。在母线 M 侧和 N 侧分别配置保护 1 与保护 2, 通过光纤网获取对端电气量来实现差动保护功能。

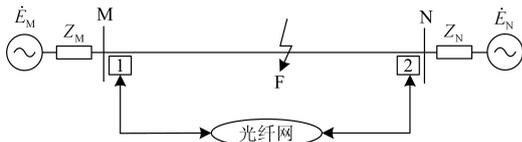


图 1 双电源系统
Fig. 1 Double-source system

1.1 电压相量平面分析

当线路 MN 上 F 点发生单相接地故障时, 电压相量图^[18]如图 2 所示。

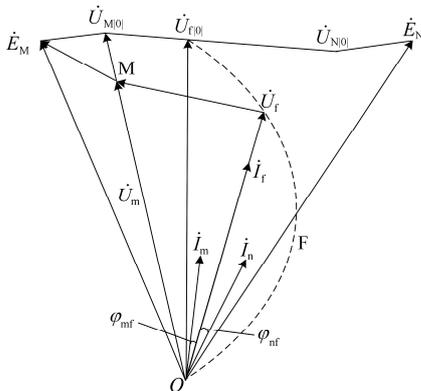


图 2 单相接地故障时电压相量图
Fig. 2 Vector diagram of voltage when a single-phase grounding fault occurs

其中, $\dot{U}_{M|0}$ 、 $\dot{U}_{N|0}$ 、 $\dot{U}_{f|0}$ 分别表示故障前保护 1 处、保护 2 处和故障点 F 的电压; \dot{U}_m 、 \dot{I}_m 分别表示故障后保护 1 处的测量电压和电流; \dot{I}_n 表示故障后保护 2 处的测量电流; \dot{U}_f 、 \dot{I}_f 分别表示故障后故障点 F 的电压和电流, 经不同过渡电阻发生故障时, \dot{U}_f 将在以 $\dot{U}_{f|0}$ 为弦的圆弧上移动, 且故障电阻越大 \dot{U}_f 越靠近 $\dot{U}_{f|0}$; φ_{mf} 表示 \dot{I}_m 与 \dot{I}_f 的夹角; φ_{nf} 表示 \dot{I}_f 与 \dot{I}_n 的夹角。

根据图 2 可知, 线路 MN 两侧保护安装处电流 \dot{I}_m 与 \dot{I}_n 的夹角为

$$\varphi_{mn} = \varphi_{mf} + \varphi_{nf} = \arg\left(\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_f}\right) + \arg\left(\frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_n}\right) \quad (1)$$

式中, \arg 表示求相角。

根据单相接地故障时的复合序网图, 故障点序电流和故障点电流间存在关系:

$$\dot{I}_{fi} = \frac{1}{3} \dot{I}_f \quad (2)$$

式中, \dot{I}_{fi} 表示故障点序电流, $i=2,0$ 。

因此, 保护安装处的序电流与故障点电流之间关系可表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_{mi} = C_{mi} \dot{I}_{fi} = \frac{1}{3} C_{mi} \dot{I}_f = \frac{1}{3} \frac{Z_{Ni} + (1-a)Z_{mni}}{Z_{Mi} + Z_{Ni} + Z_{mni}} \dot{I}_f \\ \dot{I}_{ni} = C_{ni} \dot{I}_{fi} = \frac{1}{3} C_{ni} \dot{I}_f = \frac{1}{3} \frac{Z_{Mi} + aZ_{mni}}{Z_{Mi} + Z_{Ni} + Z_{mni}} \dot{I}_f \end{cases} \quad (3)$$

式中: \dot{I}_{mi} 表示保护 1 处的序电流; C_{mi} 表示保护 1 处的序电流分配系数; \dot{I}_{ni} 表示保护 2 处的序电流; C_{ni} 表示保护 2 处的序电流分配系数; Z_{Mi} 表示 M 侧系统等值序阻抗; Z_{Ni} 表示 N 侧系统等值序阻抗; Z_{mni} 表示线路 MN 的序阻抗; α 表示故障点 F 距母线 M 的距离百分比, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

文献[19]指出, 在高压系统中可认为电流分配系数为实数, 即保护安装处序电流相位与故障点电流相位近似相等。因此, 式(1)可表达为

$$\varphi_{mn} \approx \arg\left(\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_{mi}}\right) + \arg\left(\frac{\dot{I}_{ni}}{\dot{I}_n}\right) \quad (4)$$

根据式(4), 区内故障时利用保护安装处的序电流可计算线路 MN 两侧保护安装处电流的夹角。

当图 1 所示系统在母线 N 侧发生区外故障时, 序网络如图 3 所示。图中, \dot{U}_{Fi} 表示故障点 F 序电压, R_f 表示过渡电阻, $i=2,0$ 。

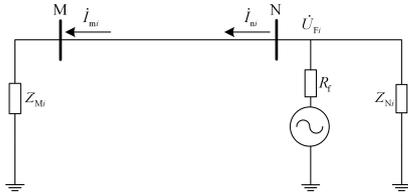


图3 区外故障时序网络图

Fig. 3 Sequence network in the case of external fault

由于区外故障时 I_m 、 I_n 为穿越性电流, 且与序电流 I_{mi} 、 I_{ni} 方向相反, 因此存在关系:

$$\arg\left(\frac{I_m}{I_n}\right) \approx \arg\left(\frac{I_{mi}}{I_{ni}}\right) \approx \arg\left(\frac{I_{ni}}{I_n}\right) \approx 180^\circ \quad (5)$$

此时, $\varphi_{mn} \approx 0^\circ$ 。

1.2 保护判据

定义单相高阻接地保护相角差为

$$\psi = \arg\left(\frac{I_m}{I_n}\right) - \varphi_{mn} \quad (6)$$

根据 1.1 节分析, 区内发生故障时, $\Psi \approx 0$; 区外发生故障时, $\Psi \approx 180^\circ$ 。根据保护区内、区外故障时线路两端电流相角差 Ψ 的差异, 构造保护判据:

$$\begin{cases} |\psi| < \psi_{set} & \text{区内故障} \\ |\psi| \geq \psi_{set} & \text{区外故障} \end{cases} \quad (7)$$

式中, Ψ_{set} 为整定值。当判断为区内故障时, 本方案将动作跳闸; 当判断为区外故障时, 本方案将不动作。

1.3 保护方案实现

本方案作为输电线路高阻接地故障的后备保护, 其动作延时设定为 Δt ; 对于保护判据中所需线路两端的电流量, 依托电流差动保护的光纤网进行传输, 但在光纤网故障情况下应自动退出; 对于整定值 Ψ_{set} , 需充分计及电流互感器误差、线路分布电容、电流传送误差、电流分配系数等因素。

式(4)中计算 φ_{mn} 时优先采用何种序电流的依据是^[20]: 对强电源而言, 由于将零序电流分配系数当作实数处理时较负序电流分配系数误差大, 计算 φ_{mn} 时优先采用负序电流; 对弱电源而言, 由于将负序电流分配系数当作实数处理时可能存在很大误差, 计算 φ_{mn} 时优先采用零序电流。

需注意的是, 由于保护判据中采用了序电流, 本方案无选相能力, 但考虑到本方案作为高阻接地故障的后备保护, 与选相元件配合使用能够满足要求^[14]。另外, 对于线路一端空载时发生的高阻接地故障, 由于电流差动保护具有足够的灵敏度, 能够可靠地动作跳闸, 本方案将不再进行考虑; 对于系统振荡, 由于不存在序电流, 本方案应不动作。

2 仿真验证

采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建图 1 所示仿真模型对本方案进行仿真验证。参数如下: 线路 $R_1=0.029 \Omega/\text{km}$, $X_1=0.362 \Omega/\text{km}$, $C_1=500 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$; $R_0=0.255 \Omega/\text{km}$, $X_0=0.971 \Omega/\text{km}$, $C_0=800 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$; 全长为 200 km。系统 E_M 阻抗 $Z_{M1}=0.625+j3.545 \Omega$, $Z_{M0}=0.99+j5.613 \Omega$, 电压为 $220 \angle \delta \text{ kV}$; 系统 E_N 阻抗 $Z_{N1}=2.726+j15.461 \Omega$, $Z_{N0}=3.595+j20.386 \Omega$, 电压为 $220 \angle 0^\circ \text{ kV}$ 。保护判据中电流量的提取采用全周傅氏算法, 采样频率为 2 000 Hz; 整定值 Ψ_{set} 为 90° ; 故障时刻 $t=0.5 \text{ s}$ 。

2.1 区内故障仿真

1) 不同故障相别故障

当 $\delta=15^\circ$, 在保护区内距母线 M 侧 70 km 处经 100Ω 过渡电阻发生不同相别的单相接地故障时, 仿真结果如图 4 所示。

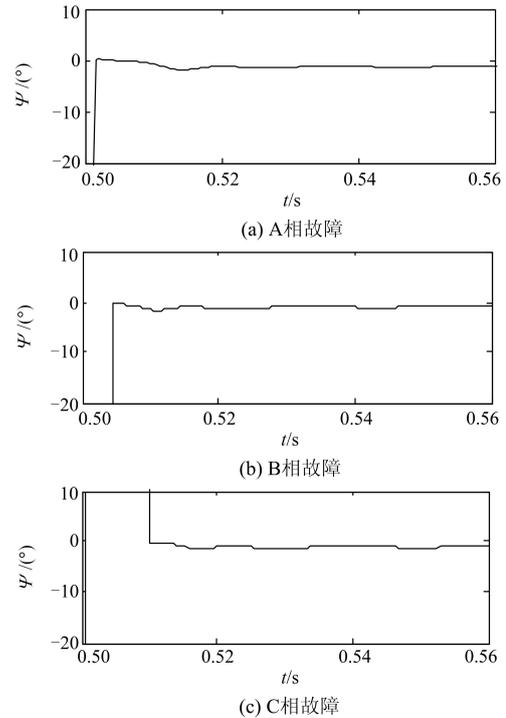


图4 不同相别发生单相接地故障时仿真结果

Fig. 4 Simulation results when a single-phase grounding fault occurs of different fault phase

可以看出, 本方案不受故障相别的影响, 在区内经过渡电阻发生单相接地故障时, 能够准确地动作, 且具有足够的灵敏度。

2) 经不同过渡电阻故障

当 $\delta=15^\circ$, 在保护区内距母线 M 侧 160 km 处经不同过渡电阻发生 B 相接地故障时, 仿真结果如

图 5 所示。可以看出，本方案不受过渡电阻影响，不论保护区内单相接地时过渡电阻的大小，本方案均能够可靠动作。

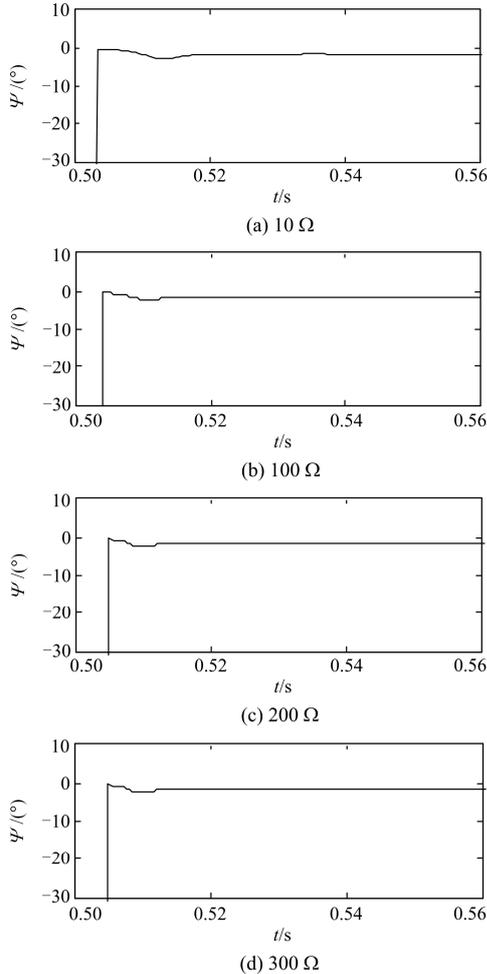


图 5 经不同过渡电阻发生单相接地故障时仿真结果
Fig. 5 Simulation results when a single-phase grounding fault occurs via different fault resistance

3) 不同位置发生故障

当 $\delta=15^\circ$ ，在保护区内距母线 M 侧不同位置经 $100\ \Omega$ 过渡电阻发生 A 相接地故障时，仿真结果如图 6 所示。

可以看出，本方案不受故障位置的影响，不论在保护安装处的近端或远端发生单相高阻接地故障时均能够正确动作，可靠性高。

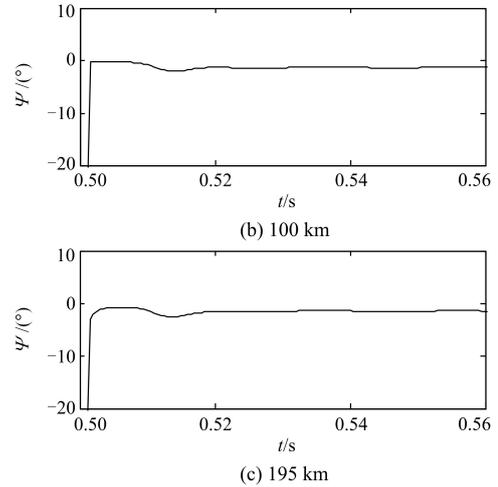
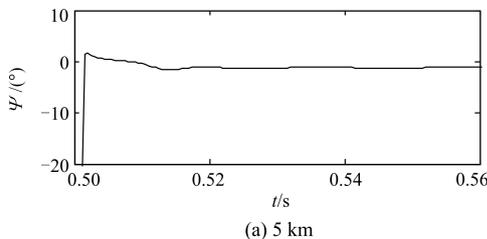


图 6 不同位置发生单相接地故障时仿真结果
Fig. 6 Simulation results when a single-phase grounding fault occurs at different fault location

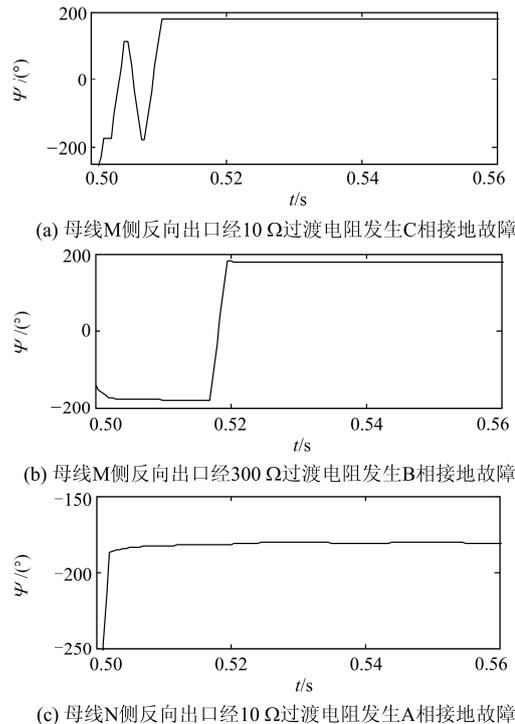
2.2 区外故障仿真

当 $\delta=15^\circ$ ，在保护区外经不同过渡电阻发生单相接地故障时，仿真结果如图 7 所示。

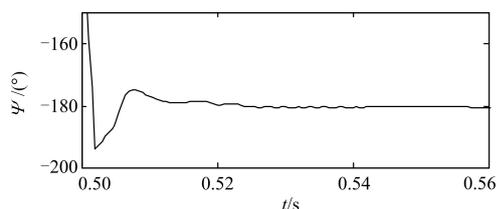
可以看出，本方案具有良好的可靠性，不论过渡电阻的大小，在保护区外发生故障时均能够正确不动作，且不受故障相别的影响。

2.3 不同运行工况仿真

不同运行工况下，在保护区内距母线 M 侧 $140\ \text{km}$ 处经 $150\ \Omega$ 过渡电阻发生 C 相接地故障时，仿真结果如图 8 所示；在保护区外经 $200\ \Omega$ 过渡电阻发生 C 相接地故障时，仿真结果如图 9 所示。



(a) 母线M侧反向出口经 $10\ \Omega$ 过渡电阻发生C相接地故障
(b) 母线M侧反向出口经 $300\ \Omega$ 过渡电阻发生B相接地故障
(c) 母线N侧反向出口经 $10\ \Omega$ 过渡电阻发生A相接地故障



(d) 母线N侧反向出口经200 Ω过渡电阻发生C相接地故障

图7 保护区外发生单相接地故障时仿真结果

Fig. 7 Simulation results when a single-phase grounding external-fault occurs

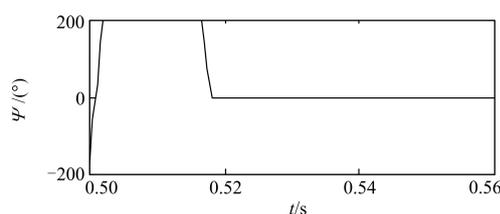
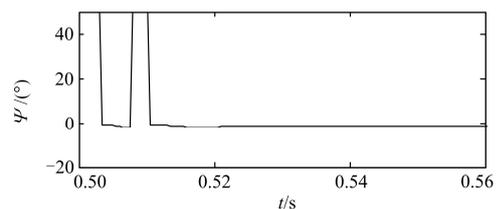
(a) $\delta=30^\circ$ (a) $\delta=-30^\circ$

图8 不同运行工况下保护区内发生单相故障时仿真结果

Fig. 8 Simulation results when a single-phase grounding internal-fault occurs under different operation conditions

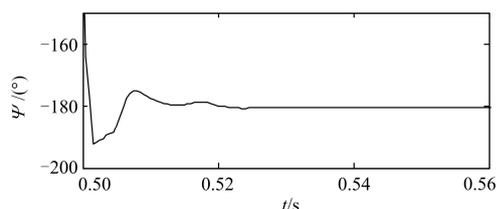
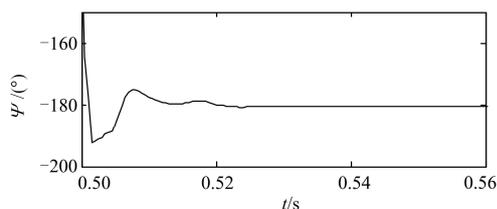
(a) $\delta=20^\circ$ 时母线N反向出口处故障(b) $\delta=-20^\circ$ 时母线N反向出口处故障

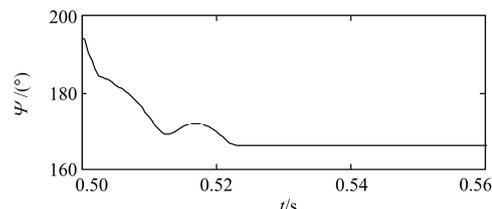
图9 不同运行工况下保护区外发生单相故障时仿真结果

Fig. 9 Simulation results when a single-phase grounding external-fault occurs under different operation conditions

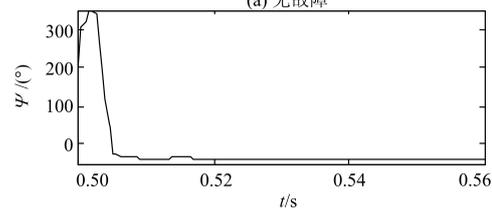
可以看出, 本方案不受运行工况的影响, 在保护区内发生单相高阻接地故障时能够正确动作; 在保护区外发生单相高阻接地故障时能够正确不动作。

2.4 非全相运行仿真

非全相运行状态下, 在保护区内无故障和距母线M侧150 km处经50 Ω过渡电阻发生B相接地故障时, 仿真结果如图10所示。可以看出, 本方案在非全相运行状态下, 无故障时能够正确不动作; 健全相发生保护区内高阻接地故障时能够正确动作。



(a) 无故障



(b) 健全相故障

图10 非全相运行下仿真结果

Fig. 10 Simulation results for open-phase operation condition

3 结论

本文提出了一种基于电压相量平面的单相高阻接地保护方案, 仿真结果表明, 本方案具有以下特点:

1) 不受故障相别、过渡电阻、故障位置和运行工况等因素的影响。

2) 具有极高的灵敏性和可靠性, 在保护区内发生故障时能够正确动作, 在保护区外发生故障时能够可靠不动作。

3) 仅利用电流量信息计算, 可作为电流差动保护的有效补充, 具有较高的工程价值。

参考文献

- [1] 赵萍, 裘愉涛, 徐华, 等. 适用于多点T接的新型电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 152-157. ZHAO Ping, QIU Yutao, XU Hua, et al. A new current differential relay scheme for multi "T" nodes transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 152-157.
- [2] 徐晓春, 裘愉涛, 赵萍, 等. 基于多维度相互校验的线路电流差动保护自校正同步策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 135-139. XU Xiaochun, QIU Yutao, ZHAO Ping, et al. Multi-dimensional cross-checking based self-correcting synchronization strategy for line current differential

- protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 135-139.
- [3] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西. 电力线路行波差动保护与电流差动保护的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 1-8.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi. Comparative study of traveling wave differential protection and current differential protection for power lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 1-8.
- [4] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [5] 裘愉涛, 凌光, 王一, 等. 浙江电网 220 kV 及以上交流保护十年运行状况综述[J]. 浙江电力, 2017, 36(9): 1-7.
QIU Yutao, LING Guang, WANG Yi, et al. Analysis on relaying protection and its operation conditions in 220 kV and above AC system of Zhejiang power grid in the last ten years[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(9): 1-7.
- [6] XIA J D, SUONAN J, SONG G B, et al. Transmission line individual phase impedance and related pilot protection[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2011, 33(9): 1563-1571.
- [7] MA J, PEI X, MA W, et al. A new transmission line pilot differential protection principle using virtual impedance of fault component[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2015, 38(1): 37-44.
- [8] 苗世洪, 刘沛. 超高压输电线路的自适应保护判据[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 43-49.
MIAO Shihong, LIU Pei. Adaptive protection criterion for EHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 43-49.
- [9] 刘凯, 李幼仪, 伊沃布林西奇, 等. 自适应线路差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3440-3450.
LIU Kai, LI Youyi, IVO BRNCIC, et al. A novel adaptive differential line protection principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3440-3450.
- [10] BOLANDI T G, SEYEDI H, HASHEMI S, et al. Impedance-differential protection: a new approach to transmission-line pilot protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 30(6): 2510-2518.
- [11] MA J, WANG T, WANG Z P, et al. A new pilot protection scheme based on virtual sequence transition impedance[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(9): 937-948.
- [12] 吴继维, 童晓阳, 廖小君, 等. 基于零序差动阻抗的输电线路保护新原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 11-17.
WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. Transmission line protection principle based on zero sequence differential impedance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 11-17.
- [13] LIU S, LI J, WU J, et al. Ultra-high voltage/extra-high voltage transmission-line protection based on longitudinal tapped impedance[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(17): 4158-4166.
- [14] 索南加乐, 刘凯, 张怿宁, 等. 基于电阻性差流的差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 45-59.
SUONAN Jiale, LIU Kai, ZHANG Yining, et al. New principle of differential protection based on the resistance component of differential current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 45-59.
- [15] 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.
- [16] MA J, MA W, QIU Y, et al. An adaptive distance protection scheme based on the voltage drop equation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1931-1940.
- [17] MA J, YAN X, MA W, et al. A new adaptive distance protection scheme for a transmission line[J]. Electric Power Components and Systems, 2016, 44(1): 1-17.
- [18] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3 版. 北京:中国电力出版社, 2005.
- [19] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2 版. 西安:西安交通大学出版社, 2007.
- [20] MA J, YAN X, FAN B, et al. A novel line protection scheme for a single phase-to-ground fault based on voltage phase comparison[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2018-2027.

收稿日期: 2017-11-12; 修回日期: 2018-03-06

作者简介:

赵志仁(1966—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行管理;

马伟(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: jnyz-mawei@163.com

丁冬(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行管理。

(编辑 许威)