

# 输电网分布电容对负序方向元件的影响及对策研究

王云昊, 刘宪栩, 吴杰

(国网天津城西供电分公司, 天津 300113)

**摘要:** 分布电容会对电力系统的正常运行产生影响。详细分析了输电网中分布电容对负序方向保护的影响机理, 研究表明低电压的输电网中线路分布电容对负序方向元件的影响较大。针对分布电容可能导致负序方向元件误动的情形, 提出了一种新的基于正序基波电流幅值变化趋势的解决措施。大量的 PSCAD/EMTDC 仿真实验验证了结论的正确性。

**关键词:** 输电网; 分布电容; 负序方向元件; 正序电流

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)01-0027-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.01.006

## Effect of Distributed Capacitance in Transmission Network on Negative Sequence Directional Element and Its Countermeasure

Wang Yunhao, Liu Xianxu, Wu Jie

(State Grid Tianjin Chengxi Electric Power Company, Tianjin 300113, China)

**Abstract:** The distributed capacitance has effect on the stability of power system. The effect mechanism of distributed capacitance on negative sequence directional element is analyzed in detail. The analysis results show that the distributed capacitance will have a greater effect on negative sequence directional element when the transmission voltage decreases. Then, a novel countermeasure based on the change trend of positive sequence fundamental current is presented. A lot of simulations with PSCAD/EMTDC prove these conclusions to be correct.

**Key words:** transmission network; distributed capacitance; negative sequence directional element; positive sequence current

## 0 引言

根据电压等级的不同, 电网一般分为配电网和输电网。现阶段研究表明, 无论是输电网还是配电网, 相与相、相与地之间都存在分布电容。由于配电网电压等级较低, 分布电容较小, 因此配电网中一般不考虑分布电容的影响。但随着电压等级的升高, 分布电容越来越大, 分布电容就不能忽略<sup>[1]</sup>。

经典继电保护原理一般基于工频量, 特别是正序工频量。但随着电力网络的不断发展, 基于正序量保护存在灵敏度不足问题。因此基于其他序分量的保护得到了大量的应用<sup>[2]</sup>。

为了增强特高压输电能力, 一般在线路上接入串补装置, 因此相关学者研究了串补装置对相应保护的影响<sup>[3-5]</sup>。事实上, 特高压本身较大的分布电容, 同样会对继电保护产生影响<sup>[6]</sup>。文献[7]从线

路两侧负序电流相位的角度研究了特高压分布电容对负序方向保护的影响, 并提出了一种基于精准贝瑞龙模型的解决措施。文献[8]基于仿真验证的手段分析了特高压分布电容对负序方向元件的影响, 但并未提出应对措施。

下面从负序方向保护的工作原理出发, 详细分析了分布电容对负序方向元件的影响。分析表明, 在考虑分布电容的输电网中, 随着电压等级的提高, 分布电容对负序方向元件的影响就会降低。针对分布电容可能导致负序保护误动的工况, 提出了一种基于正序电流幅值变化趋势的解决措施。仿真结果验证了分析结论的正确性。

## 1 分布电容对负序方向元件的影响机理研究

### 1.1 负序方向元件工作原理

图1是典型的输电网双端电源系统示意图,其中: $E_M$ 、 $E_N$ 表示两端系统电动势; $Z_{M2}$ 、 $Z_{N2}$ 分别表示两侧系统的负序阻抗; $L$ 表示输电线路; $i_{m2}$ 、 $i_{n2}$ 、 $u_{m2}$ 、 $u_{n2}$ 分别表示流过M、N两侧保护安装处的负序电流和电压; $k$ 表示内部故障; $k_1$ 表示外部故障。

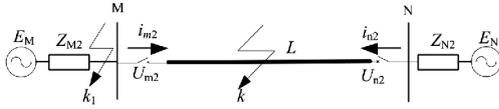


图1 典型双侧电源系统图

当 $k$ 点发生故障时,M侧负序电压和电流存在如下关系:

$$-Z_{M2} \dot{I}_{m2} = \dot{U}_{m2} \quad (1)$$

当 $k_1$ 点发生故障时,M侧负序电压和电流存在如下关系:

$$(Z_{L2} + Z_{N2}) \dot{I}_{m2} = \dot{U}_{m2} \quad (2)$$

式中 $Z_{L2}$ 表示线路L的负序阻抗。

由式(1)、式(2)可以得出M侧在区内、外部故障时电压和电流的相量关系图,如图2所示。图2中 $\varphi_K$ 表示线路阻抗角,一般约为 $80^\circ$ <sup>[1]</sup>,因此在一般分析中,认为电抗值远大于电阻值,即 $\varphi_K \approx 90^\circ$ 。

由图2可以看出,内部故障时,保护安装处的负序电压滞后负序电流约 $90^\circ$ ;而外部故障时,负序电压超前负序电流约 $90^\circ$ 。考虑测量误差、过渡电阻等因素影响时的负序方向元件的判别式为

$$\begin{cases} \arg \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \in (-180^\circ, 0^\circ) & \text{内部故障} \\ \arg \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} \in (0^\circ, 180^\circ) & \text{外部故障} \end{cases} \quad (3)$$

下面将重点分析考虑分布电容时对负序方向保护的影响。

### 1.2 分布电容对负序方向元件的影响机理

在输电网中,分布电容较大,一般不能忽略,为此将图1中线路L进行T型等值,同时假定线路发生了外部故障,图3给出了在此工况下等效负序网络图,图中: $k_1$ 表示故障点; $C$ 表示分布电容; $i_{c2}$ 表示流过分布电容的负序电流; $U_{k2}$ 表示故障点处负序电压源。

由图3可知,对于M侧负序方向元件存在

$$\dot{U}_{m2} = -Z_{m2} \dot{I}_{m2} \quad (4)$$

显然此时M侧负序方向元件根据式(3),判为

正方向,但对于N侧,存在

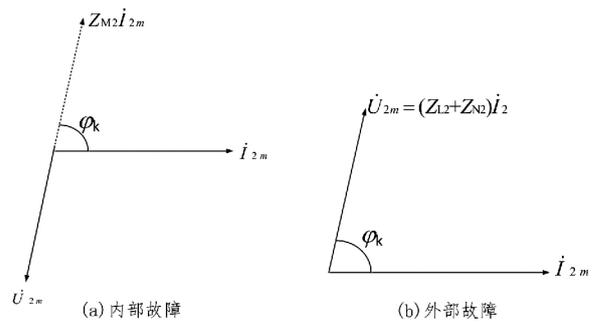


图2 不同故障时负序元件相量图

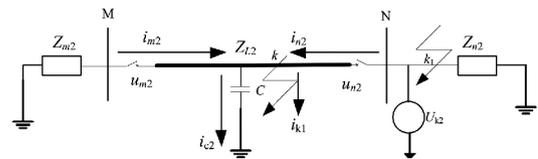


图3 负序网络图

$$\left( \frac{(0.5Z_{L2} + Z_{m2}) \frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + 0.5Z_{L2} + Z_{m2}} + 0.5Z_{L2} \right) \dot{I}_{n2} = \dot{U}_{n2} \quad (5)$$

为了便于分析,假定全系统中电抗分量远大于电阻分量,并令 $1/\omega C = X_c$ ,则式(5)进一步简化为

$$\left[ j0.5X_{L2} - j \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)} \right] \dot{I}_{n2} = \dot{U}_{n2} \quad (6)$$

令 $A = j0.5X_{L2} - j \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)}$ ,显然存在如下两种情形:

在如下两种情形:

$$1) |0.5X_{L2}| > \left| \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)} \right|, \text{此时 } A$$

呈现感性性质,因此N侧负序方向元件将故障判为反方向,进而向M侧发出闭锁信号(以闭锁式方向保护为例),因此负序方向保护能可靠不动作;

$$2) |0.5X_{L2}| < \left| \frac{X_c(0.5X_{L2} + X_{m2})}{(0.5X_{L2} + X_{m2} - X_c)} \right|, \text{此时 } A$$

呈现容性性质,N侧负序方向元件将故障判为正方向,加之此时M侧同样判为正方向,此时保护误动。

随着电压等级的升高,分布电容容抗值 $X_c$ 不断下降,此时情形1)更容易满足;但随着电压等级的下降,容抗值 $X_c$ 增大,则情形2)更容易满足。因此在输电网中,电压等级越低,分布电容对负序方向元件的影响就越大。为此需要寻求一种防止负序方向元件误动的措施。

## 2 基于正序电流幅值变化趋势的预防措施

以图3为例,当发生外部故障( $k_1$ )时,线路两侧正序电流之和为流过分布电容的正序电流,即  $I_{m1} + I_{n1} = I_{c1}$  (下标1表示正序分量)。但是,由于外部故障造成线路全线电压下降,因此  $I_{c1}$  一般将变小。而发生内部故障( $k$ )时,显然存在  $I_{m1} + I_{n1} = I_{c1} + I_{k1}$ ,  $I_{k1}$  表示流过故障  $k$  点的正序电流,此时虽然  $I_{c1}$  降低,但由于短路电流的急剧增大,所以  $I_{m1} + I_{n1}$  的幅值也增大。系统正常运行时,  $I_{m1} + I_{n1}$  幅值几乎不变,为电容电流。因此可以利用线路两侧保护安装处正序电流幅值之和的变化趋势来识别区内、外部故障:当  $I_{m1} + I_{n1}$  下降时,即使两侧负序方向元件都判为正方向,保护也不能动作;反之,保护可靠动作。

图4给出了不同工况下保护安装处两侧正序电流幅值之和的变化趋势。由图4可以看出,保护安装处两侧正序电流幅值之和正常运行时不变,内部故障时呈现上升趋势,而外部故障时呈现下降趋势。因此可以利用此特征来进一步区分区内、外故障,确保负序方向保护不误动:当负序方向元件感受到的方向即使都为正方向时,如果两侧正序电流幅值之和呈现降低的趋势,要将负序方向元件退出运行。

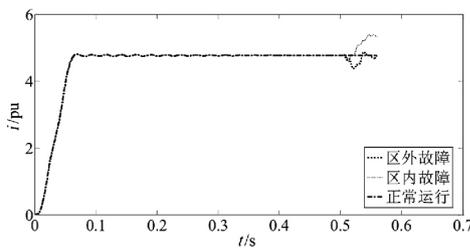


图4 不同工况时正序电流幅值变化趋势

图5给出了在输电网下负序方向保护动作逻辑框图,其中  $P_2+$  表示保护安装处两侧感受到的负序方向都为正方向,  $I_1 \uparrow$  表示两侧正序电流之和呈现上升趋势。如果正序电流幅值呈现下降趋势,则不满足负序保护动作逻辑,保护能可靠不动作。



图5 输电网负序方向元件动作逻辑

## 3 仿真实验

基于 PSCAD/EMTDC 搭建了图1所示的仿真模型,其中模型参数如表1所示。

### 3.1 外部故障时负序方向元件仿真结果

表1 线路参数列表 单位:  $\Omega$

参数	数值	参数	数值
正序电阻	0.007 58	零序电阻	0.154 210
正序感抗	0.263 65	零序感抗	0.830 600
正序容抗	0.013 97	零序容抗	0.009 296

注:线路长度 200 km,电压等级 220 kV。

图6给出了图1中  $k_1$  点发生 AB 接地故障时保护安装处两侧负序方向元件的判别结果。通过图6可以看出,此时线路两侧电压与电流的相位关系满足内部故障的判别条件,保护会动作,造成保护误动。因此需要新的解决措施来防止保护的误动作。

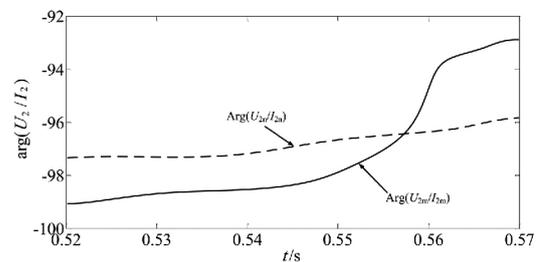


图6 外部故障时仿真结果

### 3.2 预防措施的仿真实验

图7给出了在与图6相同故障形式时保护安装处两侧正序电流幅值之和的变化趋势。通过图7可以看出,此时正序电流幅值呈现下降趋势,如图中虚线框所示,随后才恢复正常。因此利用图5新的动作逻辑,可以确保负序方向保护不误动。

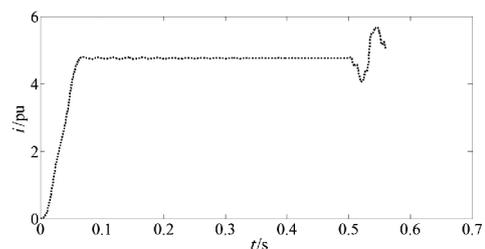


图7 正序电流幅值变化曲线

## 4 结论

详细分析了分布电容对负序方向保护的影响,

其主要结论如下:

1) 在考虑分布电容影响的输电网中,随着电压等级的降低,分布电容对负序方向元件影响增大。

2) 区外故障时,保护安装处两侧正序电流幅值之和呈现下降趋势,而区内故障时呈现上升趋势,正常运行时保持不变。

利用此特征构成输电网负序方向保护的逻辑,可以有效防止区外故障时保护误动的发生。

参考文献

[1] 黄少锋. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2015.

[2] 申志成,张慧媛,龚仁敏,等. 基于全故障类型的负序方向元件改进方法[J]. 电测与仪表,2016,53(8):124-128.

[3] 李振动,赵青春,董杰,等. 串联补偿对差动保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(10):139-143.

[4] 唐萃,尹项根,戚宣威,等. 大串补度输电线路的电流差动保护分析与对策[J]. 电力系统自动化,2015,39

(7):157-163.

[5] 关永刚,郭佩琪,项祖涛,等. 特高压串补线路短路电流的延时过零特性[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2879-2886.

[6] 张尧. 1000 kV 特高压输电线路分布电容对继电保护影响的研究[D]. 南宁:广西大学,2014.

[7] 薛士敏,贺家李,李永丽. 特高压输电线路分布电容对负序方向纵联保护的影响[J]. 电网技术,2008,32(17):94-97.

[8] 汤枫,袁越,王宾,等. 特高压交流输电线路负序方向保护动作特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2007(s1):36-41.

作者简介:

王云昊(1986),硕士研究生、工程师,主要从事电网调控运行工作;

刘宪翔(1982),硕士研究生、高级工程师,主要从事电网调控运行工作;

吴杰(1981),硕士研究生、工程师,主要从事电网调控运行工作。

(收稿日期:2017-09-10)

(上接第26页)

电磁暂态仿真建模验证了该对策的可行性。结果表明,所提出的方法能够有效地降低直流单极接地故障下直流融冰装置的运行风险,对于指导现场融冰、防范直流融冰装置单极接地故障下的运行风险具有较好的实用性。

参考文献

[1] Huneault M, Langheit C, S-arnaud R, et al. A Dynamic Programming Methodology to Develop De-icing Strategies during Ice Storms by Channeling Load Currents in Transmission Networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1604-1610.

[2] 许树楷,杨煜,傅闯. 南方电网直流融冰方案仿真研究[J]. 南方电网技术,2008,2(2):31-36.

[3] 张庆武,田杰,傅闯,等. 特高压直流控制系统融冰工作方式研究[J]. 高电压技术,2008,34(11):2276-2282.

[4] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2003,29(1):6-10.

[5] 傅闯,烧宏,黎小林,等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):53-56.

[6] Horwill C, Davidson C C, Granger M. An Application of

HVDC to the De-icing of Transmission Lines [C]. Proceedings of the 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, USA2006: 529-534.

[7] 孙才新,蒋兴良,熊启新,等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析[J]. 中国电机工程学报,2006,23(3):141-145.

[8] Dery A, Gingras J, Hydro P. Québec De-icing Projects [C]. The 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, June 2005.

[9] Horwill C, Davidson C, Granger M, et al. An Application of HVDC to the De-icing of Transmission Lines [C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES Dallas, USA.

[10] Granger M, Dutil A, Nantel A. Performance Aspects of Levis Substation De-icing Project Using DC Technology [C]. The 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, June 2005.

作者简介:

李训(1975),工程师,目前主要从事电能质量、水电站及防汛管理工作。

(收稿日期:2017-11-20)