

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.09.034

半波长交流输电线路贝瑞隆差动保护改进算法

陆金凤, 赵青春, 谢 华, 刘 奎, 朱晓彤

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 210000)

摘要: 半波长交流输电线路输送距离长、电压等级高, 呈现出明显的分布参数特性, 传统的继电保护原理不再适用。文中提出了一种高灵敏度、低灵敏度相配合的贝瑞隆差动保护改进算法, 保护半波长交流输电线路的全长。其中低灵敏度贝瑞隆差动, 用于保护半波长线路区内两端区域短路故障。高灵敏度贝瑞隆差动, 用于保护半波长线路区内中间段区域短路故障。基于电磁暂态仿真软件PSCAD搭建特高压半波长输电线路仿真模型, 并对提出的保护算法进行了大量的仿真实验。结果表明, 低灵敏度贝瑞隆差动保护可以保证区内两端区域保护快速性, 高灵敏度贝瑞隆差动保护可以提升区内中间段区域保护灵敏性。

关键词: 半波长交流输电; 贝瑞隆; 差动保护; 灵敏度

Improved Bergeron Differential Protection Algorithm for Half-wavelength AC Transmission Line

LU Jinfeng, ZHAO Qingchun, XIE Hua, LIU Kui, ZHU Xiaotong

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Due to long transmission distance and high voltage grade, the half-wavelength AC transmission line (HWACT) shows obvious distributed parameter characteristics, so the traditional relay protection algorithm is no longer applicable. This paper proposes an improved Bergeron differential protection algorithm which can protect the whole area of HWACT. The algorithm consists of two different sensitivities of the differential protection. The low sensitivity of the differential protection is for the short-circuit faults at both ends, and the high sensitivity is for the short-circuit faults in middle section. A simulation model of HWACT based on PSCAD is established to verify the algorithm. Simulation results indicate that the low sensitivity of the differential protection can ensure speedy protection, and the high sensitivity of the differential protection can improve the protection sensitivity.

Key words: half-wavelength AC transmission line; Bergeron; differential protection; sensitivity

0 引言

随着能源互联网的建设, 半波长交流输电^[1-4]作为一种高效的远距离洲际输电方式, 具有良好的应用前景。同时, 中国幅员辽阔, 能源基地和负荷中心呈现逆向分布且距离较远, 半波长交流输电技术也有其应用环境。半波长交流输电(HWACT)是指输电的电气距离接近1个工频半波, 即3 000 km(50 Hz)的超远距离的三相交流输电。文中对半波长交流输电线路的继电保护原理展开研究。

半波长交流输电线路表现出与常规输电线路截

然不同的特征, 传统的继电保护原理已不再适用^[5-12]。半波长交流输电线路的继电保护原理研究才刚刚开始起步。文[13]提出了结合测量相角和测量距离两个条件进行故障位置判断的相间距离保护原理, 但未给出单相接地短路时的保护方案; 文[14-16]提出了直接补偿线路电容电流的贝瑞隆差动保护原理, 但未考虑在半波长线路中间段发生短路时, 贝瑞隆差动电流很小, 可靠性和灵敏性难以兼顾的问题。

文中提出了一种高灵敏度、低灵敏度相配合的贝瑞隆差动保护^[17-21]改进算法, 能够可靠切除半波

长交流输电线路全长的各种短路故障,并通过时域仿真结果验证了保护算法的可行性,为半波长交流输电线路保护装置的研制提供了理论基础。

1 半波长交流输电线路的运行特征

半波长交流输电线路简图见图1。

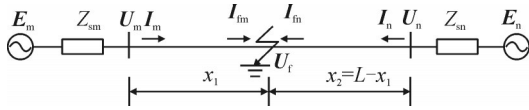


图1 半波长交流输电线路简图

Fig. 1 Simplified diagram of half-wavelength AC transmission line

半波长交流输电线路长3 000 km,应采用长线路均匀分布参数电路对其进行分析。半波长线路正常运行时,首端保护电压 U_m 、电流 I_m 与末端保护电压 U_n 、电流 I_n 之间存在如下关系

$$\begin{cases} U_m = \cosh(\gamma L)U_n - Z_c \sinh(\gamma L)I_n \\ I_m = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma L)U_n - \cosh(\gamma L)I_n \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: Z_c 为波阻抗; γ 为传播系数; L 为线路全长。

忽略半波长线路的电阻和电导, $\gamma L = \pi$ 。线路两端保护电压大小相等,方向相反;两端保护电流大小相等,方向相同。

半波长线路三相短路时,首端保护电压 U_m 、电流 I_m 与故障点短路电压 U_f 、电流 I_f 之间的关系为

$$\begin{cases} U_m = \cosh(\gamma x_1)U_f + Z_c \sinh(\gamma x_1)I_f \\ I_m = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x_1)U_f + \cosh(\gamma x_1)I_f \end{cases} \quad (2)$$

三相短路的边界条件是

$$U_f = 0 \quad (3)$$

首端系统电源与保护安装处的电压电流之间满足

$$E_m - U_m = Z_{sm} I_m \quad (4)$$

式(4)中: E_m 为线路m侧系统电动势; Z_{sm} 为m侧系统阻抗。

联立式(2)-(4),首端保护电压电流是短路点位置 x_1 的函数为

$$\begin{cases} U_m = Z_c \frac{jE_m \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)}{Z_{sm} \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) + jZ_c \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)} \\ I_m = \frac{E_m \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)}{Z_{sm} \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) + jZ_c \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, λ 为波长6 000 km,且满足 $\gamma = j2\pi/\lambda$ 。

短路点电流也是短路点位置 x_1 的函数为

$$I_{fm} = \frac{E_m}{Z_{sm} \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) + jZ_c \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)} \quad (6)$$

为方便分析,用PSCAD软件直观地仿真半波长交流输电线路保护安装处电气量随短路点位置的变化情况。

系统参数: $E_m = 1\,050 \angle 16.1^\circ \text{ kV}$, $E_n = 1\,000 \angle 180^\circ \text{ kV}$, $Z_{m1} = 30 \angle 89^\circ \Omega$, $Z_{n1} = 30 \angle 89^\circ \Omega$, $Z_{m0} = 30 \angle 89^\circ \Omega$, $Z_{n0} = 30 \angle 89^\circ \Omega$ 。

线路参数: $R_1 = 0.006\,47 \Omega/\text{km}$, $x_{L1} = 0.252\,94 \Omega/\text{km}$, $x_{C1} = 0.226\,413 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$, $R_0 = 0.139\,706 \Omega/\text{km}$, $x_{L0} = 0.876\,470\,6 \Omega/\text{km}$, $x_{C0} = 0.393\,547 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ 。

PT变比为1 000 kV/100 V,CT变比为5 000 A/1 A。

首端电气量随短路点位置变化情况见图2。下文波形图中的电压、电流、阻抗均为二次值。

半波长交流输电线路正常运行时,常规方法计算的差动电流理论上就不为零,线路中间段发生短路时,差动电流接近零,常规差动保护原理不适用于半波长线路。半波长交流输电线路中间段发生短路时,保护测量阻抗远大于负荷阻抗,且当短路点在中点时,测量阻抗相位发生 180° 的突变,常规距离保护原理同样不适用于半波长线路。因此,必须研究新的适用于半波长交流输电线路的保护原理。

2 贝瑞隆差动保护

贝瑞隆差动保护原理本身消除了线路分布电容电流对电流差动保护的影响,满足基尔霍夫电流定律,可以用来保护特高压长线路。

对于半波长交流输电线路,首端为m侧,末端为n侧。首端m侧贝瑞隆差动保护的实现方法如下:

1)m侧保护装置通过采样得到本侧各时刻三相电压、电流采样值: $u_m(t)$ 、 $i_m(t)$ 。通过光纤通道,获得对侧经采样同步后相同时刻三相电压、电流采样值: $u_n(t)$ 、 $i_n(t)$ 。

2)对电压电流进行傅氏算法,得到基波: $U_m(t)$ 、 $I_m(t)$ 、 $U_n(t)$ 、 $I_n(t)$ 。

3)用m侧t时刻的电压量 $U_m(t)$,m侧 $t-\tau$ 时刻的电压量 $U_m(t-\tau)$ 、电流量 $I_m(t-\tau)$;n侧 $t-\tau$ 时刻的电压量 $U_n(t-\tau)$ 、电流量 $I_n(t-\tau)$,计算m侧t时刻的电流计算值 $I_{sm}(t)$ 。

$$I_{sm}(t) = \frac{U_m(t)}{Z_c} + I_{mn}(t-\tau) \quad (7)$$

$$I_{mn}(t-\tau) = -\frac{1-h}{2} \left[\frac{U_m(t-\tau)}{Z_c} + hI_m(t-\tau) \right] - \frac{1+h}{2} \left[\frac{U_n(t-\tau)}{Z_c} + hI_n(t-\tau) \right] \quad (8)$$

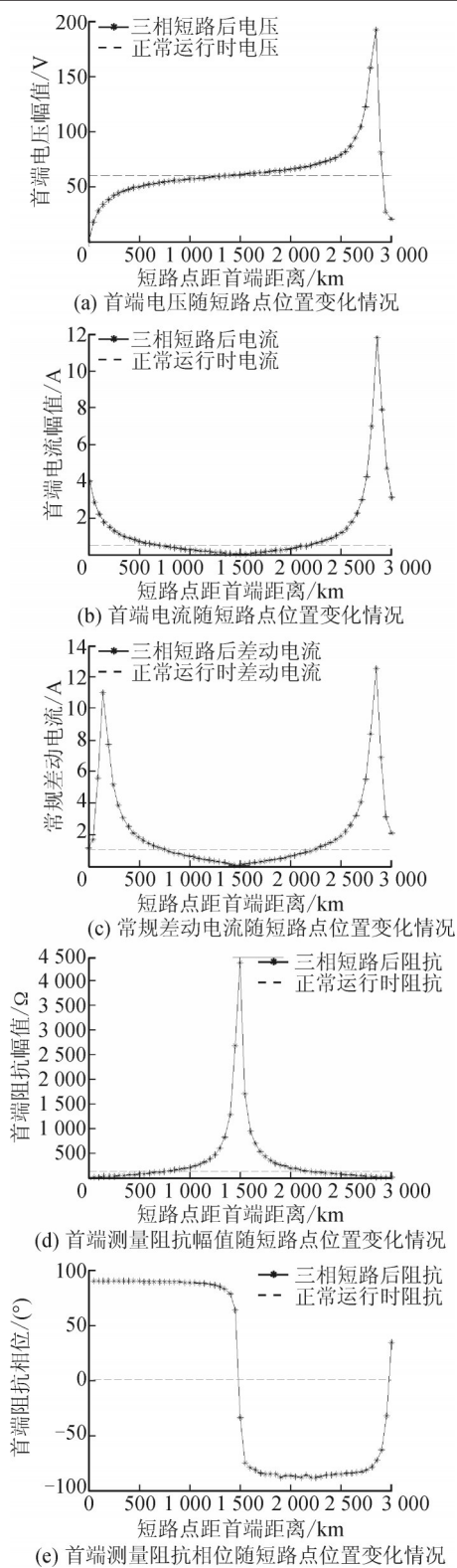


图2 首端电气量随短路点位置变化情况

Fig. 2 M-side electric parameters changed with the location of short-circuit point

$$h = \frac{Z_c - R/4}{Z_c + R/4} \quad (9)$$

式(7)-(9)中: Z_c 为波阻抗; R 为线路总电阻; τ 为电气量从n侧传到m侧的时间。

4)半波长线路首端m侧贝瑞隆差动保护的判据为

$$I_{\text{md}\varphi} = |I_{\text{m}\varphi} - I_{\text{sn}\varphi}| > I_{\text{mdset}} \quad (10)$$

式(10)中, φ 表示A、B、C三相。

末端n侧贝瑞隆差动保护的实现方法同理。

由于半波长线路三相之间的耦合,贝瑞隆模型在相量上不成立,但在模量上是成立的。所以在实际应用中,需要首先将相量转换成模量,然后利用贝瑞隆模型计算每个模量的电流计算值,最后再将模量合成为相量。

3 半波长线路应用贝瑞隆差动的问题

贝瑞隆差动电流反映的是短路点电流^[22]。以半波长交流输电线路发生区内三相短路为例,理论分析线路在不同位置发生短路故障时的短路点电流大小。

根据式(6)计算半波长线路的短路点电流为

$$I_f = \frac{E_m}{Z_{\text{sm}} \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_1) + jZ_c \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)} + \frac{E_n}{Z_{\text{sn}} \cos(\frac{2\pi}{\lambda} x_2) + jZ_c \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x_2)} \quad (11)$$

当半波长线路中点发生三相短路时

$$I_f = \frac{E_m + E_n}{jZ_c} \quad (12)$$

首端发生三相短路时

$$I_f = \frac{E_m}{Z_{\text{sm}}} - \frac{E_n}{Z_{\text{sn}}} \quad (13)$$

半波长交流输电线路两侧系统电动势之间满足 $E_m \approx -E_n$ 。因此,在半波长线路中点发生短路时,短路电流接近0,即贝瑞隆差动电流接近于0;在首末两端发生短路时,短路电流较大,即贝瑞隆差动电流较大。

利用第1节中的线路参数仿真半波长交流输电线路发生区外短路、区内短路时的贝瑞隆差动电流,故障发生在1.0 s,且一直持续。三相短路m、n侧贝瑞隆差动电流见图3,A相接地m、n侧贝瑞隆差动电流见图4。

由图4可见,半波长交流输电线路区内首末两端发生短路时,两侧的贝瑞隆差动电流都很大;区内中点发生短路时,两侧的贝瑞隆差动电流都较小,与区外短路时的差动电流处于同一数量级。因此,在半波长交流输电线路采用简单的贝瑞隆差动保护,只可以保护线路的首末两端区域,而不能保护线路的全长。

4 高低灵敏度配合的贝瑞隆差动保护

文中提出一种贝瑞隆差动保护改进算法。针

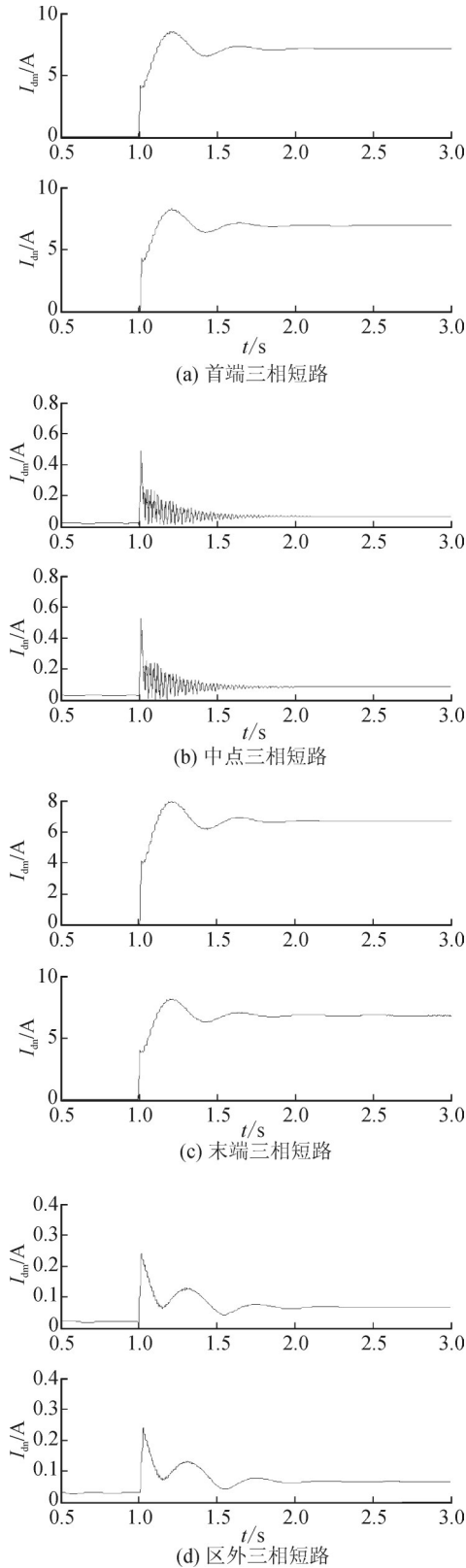


图3 三相短路m、n侧贝瑞隆差动电流

Fig. 3 Bergeron differential current (three-phase short circuit)

对半波长交流输电线路,采用低灵敏度的贝瑞隆差动保护,快速切除线路区内首末两端短路;采用高灵敏度的贝瑞隆差动保护,判断出线路区外短路或区内中间段短路,再利用辅助判据,经过一定

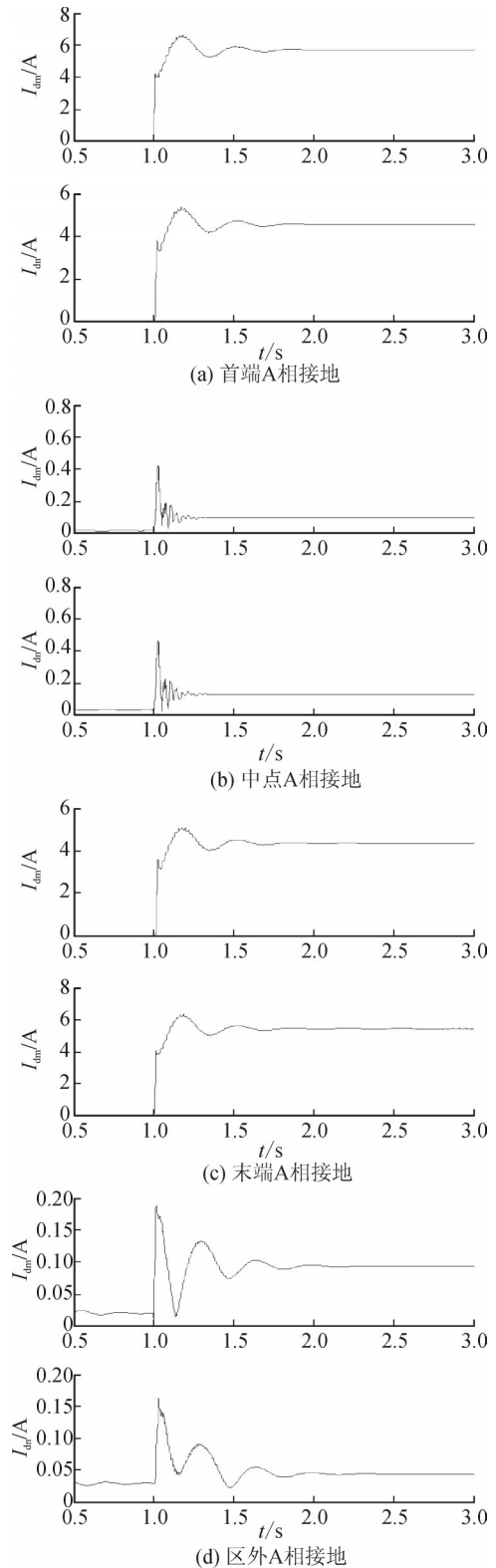


图4 A相接地m、n侧贝瑞隆差动电流

Fig. 4 Bergeron differential current (A-phase short circuit)

延时后切除区内短路,同时区外短路时保护不误动。

根据式(5),确定高灵敏度贝瑞隆差动保护的辅助判据。电源系统阻抗一般可以忽略电阻,只计其电抗分量,则可认为 $Z_{sm} = jZ_{sm}$,代入式(5)

$$I_m = \frac{-jE_m}{Z_{sm} + Z_c \tan(\frac{2\pi}{\lambda} x_1)} \quad (14)$$

半波长交流输电线路区内中间段短路时, $\tan(2\pi x_1/\lambda)$ 接近无穷大, 保护安装处电流很小, 甚至小于负荷电流; 区外短路时, 短路电流接近于区内首末端短路时的短路电流, 幅值较大, 保护安装处流过的电流也较大。因此通过判断保护电流的大小来区分线路区外短路和区内中间段短路。

高低灵敏度配合的贝瑞隆差动保护判据为:

$$I_{md\varphi} > I_{mdset1} \quad (15)$$

$$I_{md\varphi} > I_{mdset2} \quad (16)$$

$$I_{m\varphi} < I_{mset} \quad (17)$$

式(15)-(17)中: I_{mdset1} 为低灵敏度差动保护定值, 略大于半波长线路区外短路时可能出现的最大贝瑞隆差动电流; I_{mdset2} 为高灵敏度差动保护定值, 等于半波长线路保护要求切除的最小短路电流; $I_{mdset1} > I_{mdset2}$; I_{mset} 为辅助判据定值, 大于半波长线路区内中间段短路时保护安装处短路电流, 且小于半波长线路区外短路时保护安装处短路电流; φ 代表A、B、C三相。

若式(15)满足, 则判为半波长交流输电线路区内严重短路, 保护快速动作; 若式(16)、(17)同时满足, 则判为线路区内中间段短路, 经整定延时后保护动作; 若式(16)满足而式(17)不满足, 则判为线路区外短路, 保护不动作。

利用PSCAD软件获取半波长交流输电线路在不同位置发生各种类型短路时两侧保护的电压电流采样值, 半波长线路仿真参数同第1节。低灵敏度差动保护定值 I_{mdset1} 取二次值0.4 A, 高灵敏度差动保护定值 I_{mdset2} 取二次值0.1 A, 辅助判据定值 I_{mset} 取0.2 A。通过MATLAB编程, 仿真高灵敏度、低灵敏度相配合的贝瑞隆差动保护的動作时间见表1-4(从故障起始时刻开始计时)。

表1 三相短路时贝瑞隆差动保护改进算法动作情况

Table 1 Performance of improved Bergeron differential protection (three-phase short circuit)

短路点 距m侧 距离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动作 时间/ms	短路点 距m侧 距离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动作 时间/ms
0	10.0	20.0	1 800	17.5	15.0
300	13.3	21.7	2 100	17.5	13.3
600	16.7	22.5	2 400	19.2	12.5
900	19.2	22.5	2 700	20.0	11.7
1 200	20.0	20.8	3 000	20.0	10.0
1 500	64.2	64.2	区外	不动	不动

表2 单相接地短路时贝瑞隆差动保护改进算法动作情况

Table 2 Performance of improved Bergeron differential protection (A-phase short circuit)

短路点 距m侧 距离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动作 时间/ms	短路点 距m侧 距离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动作 时间/ms
0	10.0	20.8	1 800	25.8	21.7
300	12.5	21.7	2 100	27.5	21.7
600	21.7	28.3	2 400	25.0	17.5
900	26.7	26.7	2 700	22.5	13.3
1 200	50.8	54.2	3 000	20.0	9.2
1 500	67.5	71.7	区外	不动	不动

表3 两相接地短路时贝瑞隆差动保护改进算法动作情况

Table 3 Performance of improved Bergeron differential protection (B-C-phase grounding short circuit)

短路点 距m侧 距离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动作 时间/ms	短路点 距m侧 距离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动作 时间/ms
0	9.2	19.2	1 800	20.8	18.3
300	15.0	23.3	2 100	18.3	14.2
600	15.8	25.8	2 400	19.2	13.3
900	15.0	18.3	2 700	21.7	12.5
1 200	20.0	21.7	3 000	21.7	10.0
1 500	61.7	65.0	区外	不动	不动

表4 两相相间短路时贝瑞隆差动保护改进算法动作情况

Table 4 Performance of improved Bergeron differential protection (B-C-phase ungrounding short circuit)

短路点距 m侧距 离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动 作时 间/ms	短路点距 m侧距 离/km	m侧动 作时 间/ms	n侧动 作时 间/ms
0	9.2	19.2	1 800	20.0	17.5
300	15.8	24.2	2 100	19.2	15.8
600	15.0	20.8	2 400	20.0	13.3
900	15.0	18.3	2 700	22.5	17.5
1 200	20.0	21.7	3 000	22.5	12.5
1 500	65.0	68.3	区外	不动	不动

根据表1-4中可知, 在半波长交流输电线路采用高灵敏度、低灵敏度相配合的贝瑞隆差动保护, 可以保护半波长线路的全长。半波长线路区内首末两端短路时, 故障快速被切除, 出口处三相短路时, 保护動作时间为10 ms。线路区内中间段短路时, 延时一定时间故障被切除, 中点处三相短路时, 保护動作时间为64.2 ms。线路区外短路时, 保护可靠不动作。

5 结论

1) 与传统线路差动保护相比, 高低灵敏度配合

的贝瑞隆差动保护原理本身消除了线路分布电容电流对电流差动保护的影响。

2)与普通线路贝瑞隆差动保护相比,高低灵敏度配合的贝瑞隆差动保护,采用低灵敏度定值,保证快速切除线路区内首末两端短路;采用高灵敏度定值,保证半波长线路区内中间段短路时可靠动作,区外短路时可靠不动作。

3)仿真证明了高低灵敏度配合的贝瑞隆差动保护原理的正确性和可靠性,说明了这种保护原理可以适用于半波长交流输电线路。

参考文献:

- [1] 王冠,吕鑫昌,孙秋芹,等. 半波长交流输电技术的研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2010,34(16):13-18.
WANG Guan,LYU Xinchang,SUN Qiuqin,et al. Status quo and prospects of half-wavelength transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(16):13-18.
- [2] 梁旭明. 半波长交流输电技术研究及应用展望[J]. 智能电网,2015,3(12):1091-1096.
LIANG Xuming. Technology research and application prospect of half-wavelength alternating current transmission[J]. Smart Grid,2015,3(12):1091-1096.
- [3] 束洪春,曹璞璘,董俊,等. 考虑线路参数依频特性的特高压半波长交流输电线路行波传播分析[J]. 高电压技术,2015,41(3):716-723.
SHU Hongchun,CAO Pulin,DONG Jun,et al. Analysis of traveling wave in UHV half-wavelength transmission lines considering frequency dependent characteristics[J]. High Voltage Engineering,2015,41(3):716-723.
- [4] PORTELA C,TAVARES M C. Modeling simulation and optimization of transmission lines[C]//Applicability and limitations of some used procedures. Recife,Brazil:IEEE,2002:1-38.
- [5] 蒋小平,张红菊,马速良,等. 特高压带高压并联电抗器线路的行波差动保护研究[J]. 高压电器,2016,52(2):121-127.
JIANG Xiaoping,ZHANG Hongju,MA Suliang,et al. Study on traveling-wave differential protection on UHV transmission line with high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(2):121-127.
- [6] SOKOLOV N I,SOKOLOVA R N. The feasibility of using half-wave power transmission lines at higher frequencies[J]. Electrical Technology Russia,1999(1):66-84.
- [7] DIAS R,SANTO G,AREDES M. Analysis of a series tap for half-wavelength transmission lines using active filters[C]//IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Recife,Brazil:IEEE,2005:1894-1900.
- [8] 秦晓辉,张志强,徐征雄,等. 基于准稳态模型的特高压半波长交流输电系统稳态特征及暂态稳定研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):66-76.
QIN Xiaohui,ZHANG Zhiqiang,XU Zhengxiong,et al. Study on the steady state characteristic and transient stability of UHV AC half-wave-length transmission system based on quasi-steady model[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):66-76.
- [9] 娄颖,周沛洪,修木洪,等. 特高压半波长交流输电线路电磁暂态仿真[J]. 高电压技术,2012,38(6):1459-1465.
LOU Ying,ZHOU Peihong,XIU Muhong,et al. Electromagnetic transient simulation of UHV half wavelength AC transmission line[J]. High Voltage Engineering,2012,38(6):1459-1465.
- [10] 王玲桃,崔翔. 特高压半波长交流输电线路稳态特性研究[J]. 电网技术,2011,35(9):7-12.
WANG Lingtao,CUI Xiang. Research on steady-state operation characteristics of UHV half-wavelength AC power transmission line[J]. Power System Technology,2011,35(9):7-12.
- [11] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 增订版. 北京:中国电力出版社,2004.
HE Jiali,SONG Congju. Scheme of protective relaying in electric power systems[M]. Enlarged Edition. Beijing:China Electric Power Press,2004.
- [12] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
ZHANG Baohui,YIN Xianggen. Power system protective relaying[M]. Beijing:China Electric Power Press,2005.
- [13] 刘建辉. 基于分布参数的半波长交流输电线路保护原理研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
LIU Jianhui. Study on protection principle for half wavelength AC transmission line based on distributed parameters[D]. Beijing:North China Electric University,2012.
- [14] 肖仕武,程艳杰,王亚. 基于贝瑞隆模型的半波长交流输电线路电流差动保护原理[J]. 电网技术,2011,35(9):46-50.
XIAO Shiwu,CHENG Yanjie,WANG Ya. A bergeron model based current differential protection principle for UHV half-wavelength AC transmission line[J]. Power System Technology,2011,35(9):46-50.
- [15] 王亚. 半波长交流输电线路纵联差动保护原理的研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.
WANG Ya. Research on longitudinal differential protection principle for half wavelength ac transmission line[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.
- [16] 程艳杰. 半波长交流输电线路故障分析及继电保护[D]. 北京:华北电力大学,2012.
CHENG Yanjie. Analysis of the fault and the relay protection for half wavelength AC transmission line[D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.

- [17] YINING Z, JIALE S. Phaselet-based current differential protection scheme based on transient capacitive current compensation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2(4):469-477.
- [18] 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.
- [19] 余洪, 文明浩. 基于贝瑞隆模型的ATP仿真误差分析[J]. 继电器, 2007, 35(4):14-17.
YU Hong, WEN Minghao. Error analysis of ATP simulation based on Bergeron model [J]. Relay, 2007, 35(4):14-17.
- [20] 姜彤, 吕艳萍. 基于Bergeron模型的纵联电流保护新判据[J]. 电气自动化, 2014, 36(3):83-85.
JIANG Tong, LYU Yanping. A new criterion for longitudinal current protection based on Bergeron model[J]. Electrical Automation, 2014, 36(3):83-85.
- [21] 申志成, 张慧媛, 周庆捷, 等. 基于贝瑞隆模型的故障分量相位相关特高压输电线路保护新方法[J]. 智能电网, 2016, 4(5):447-451.
SHEN Zhicheng, ZHANG Huiyuan, ZHOU Qingjie, et al. A new method of phase-related UHV transmission lines protection based on fault component of bergeron model[J]. Smart Grid, 2016, 4(5):447-451.
- [22] 郑玉平, 吴通华, 丁琰. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23):50-55.
ZHENG Yuping, WU Tonghua, DING Yan. Applied criterion of current differential protection based on Bergeron model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23):50-55.
- 陆金凤(1987—), 女, 工程师, 从事电力系统继电保护工作。
- 赵青春(1980—), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护工作。
- 谢华(1983—), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护工作。
- 刘奎(1984—), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护工作。
- 朱晓彤(1976—), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护工作。

(上接第213页)

- Journal Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(1):420-427.
- [19] 王伟, 陈华庆, 韩卫. 无人机自主导航控制的FastSLAM算法研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8):68-72.
WANG Wei, CHEN Huaqing, HAN Wei. FastSLAM algorithms of autonomous navigation control of UAV, 2015, 32(8):68-72.
- [20] MONTEMERLO M, THRUN S, KOLLER D, et al. FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem[C]//Proceeding of 8th National Conference on Artificial Intelligence, and 14th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence. Edmonton: AAAI/ IAAI, 2002:593-598.
- 陈蕾(1970—), 女, 硕士, 主要从事配电自动化、信息化、智能化方面的研究。
- 徐重酉(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事配电自动化、信息化、智能化方面的研究。
- 高文婷(1978—), 女, 硕士研究生, 主要从事输配电技术、新能源方面的研究。
- 王硕(1993—), 男, 本科, 工程师, 主要从事现场一次设备及特高压设备故障诊断、带电检测等相关工作。
- 刘月娥(1980—), 女, 博士, 从事激光雷达和机器视觉等方面的研究。
- 李峥嵘(1981—), 男, 博士, 主要从事无人机智能巡检以及遥感技术等方面的研究。