

边界保护的理论基础

第一部分 故障暂态分析

哈恒旭,张保会,吕志来

(西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 近年来,基于单端暂态量的输电线路保护新原理不断涌现出来,这种利用故障产生的暂态分量是否透过线路边界的特征构成的具有全线速动的保护称为边界保护,边界保护成立的条件有两个,其一是区内外故障时,暂态分量存在差异;其二是该差异有规律性,可以被提取并且很明显,足以构成保护判据。基于这个目的,对输电线路区内外故障时的暂态分量的频谱进行了分析,发现并提取该差异,为边界保护的研究提供理论基础。全文共分为三个部分,第一部分是故障暂态分析;第二部分是线路边界折反射系数的频谱分析;第三部分是区内外故障暂态分量频谱差异的提取和 EMTP 仿真。本文是第一部分,利用网格法对输电线路在区内、正方向区外和反方向三个典型位置故障时的暂态分量进行分析和比较,并发现了不同故障方向时暂态分量的差异和正方向区内外故障的差异,前者的差异主要体现在线路边界的反射系数的频谱特征中,后者主要体现在线路边界的透射系数的频谱特征中。

关键词: 故障暂态分量; 输电线路; 正方向; 反方向故障; 区内外故障; 反射系数; 透射系数

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)09-0007-04

1 引言

随着电力系统规模的日益扩大,要求继电保护切除故障的时间更短。目前在电力系统中广泛应用的是基于工频分量变化特征的纵联保护方案,整套保护的动作时间不够快^[1]。利用故障暂态分量构成线路的保护可以更大限度地缩短保护时间。早期的基于暂态分量的保护原理的研究是从行波保护开始的,并在70年代以后相继研制出行波保护装置,其特点是动作速度快,不受系统运行方式和系统振荡的影响。但由于行波检测手段和信号处理工具的影响,保护的可靠性较差^[2,3]。随着DSP技术的不断发展和小波分析等信号处理工具的出现使得行波保护的研究又迎来了新的高潮^[4,5]。在各种行波保护原理中,除了行波距离外都需要两端电气量的配合,利用单端电气量构成输电线路全线速动的超高速保护是继电保护研究者梦寐以求的理想。

近年来,一系列的基于单端暂态量的保护新原理相继出现,文献[6]是利用线路阻波器的带阻特性将区内故障时弧光非线性过渡电阻产生的某个频带(频率中心为阻波器的中心频率)高频电压噪声限制在保护区内,而将区外故障时的高频电压噪声阻挡在保护区外的特点,形成保护原理。文献[7]是利用母线对地杂散电容的作用,使得区外故障时暂态电

流噪声高频分量穿过母线而大量衰减,而区内故障时电流噪声高频分量未穿过母线而几乎没有衰减这一差异构成保护判据。文献[8]同样是利用母线边界的杂散电容和阻波器,利用小波的多尺度边缘检测提取暂态电流行波的波头陡度来构成区内外故障的判据。以上原理的共同特征都是利用故障产生的暂态分量是否通过线路边界这一特征构成保护判据。这种在单端利用故障暂态分量是否通过线路边界构成的全线速动的超高速保护原理,称为边界保护。

本文对输电线路故障后的暂态分量进行理论分析,发现区内外故障时暂态分量的两个差异:不同故障方向时暂态分量的差异和正方向区内外故障时的差异。前者与线路边界的反射系数有关,后者与线路边界的折射系数有关。

2 输电线路故障分析

2.1 输电线路模型^[9,10]

假设有一条单相输电线路,保护安装处M为坐标原点,在电路上任意一点x处,总有下式成立

$$- \frac{dU_x(\omega)}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) I_x(\omega) \quad (1)$$

$$- \frac{dI_x(\omega)}{dx} = (G_0 + j\omega C_0) U_x(\omega) \quad (2)$$

式中: $U_x(\omega)$ 、 $I_x(\omega)$ 为 x 点的电压和电流的频率域

表达式; R_0, L_0, G_0, C_0 为线路单位长度的参数。

假设 M 点的电压 U_M 和电流 I_M 为已知, 则线路上任意一点 x 处的电压电流为

$$U_x(\) = \frac{U_M + Z_c I_M}{2} e^{-x} + \frac{U_M - Z_c I_M}{2} e^x \quad (3)$$

$$I_x(\) = \frac{U_M + Z_c I_M}{2 Z_c} e^{-x} - \frac{U_M - Z_c I_M}{2 Z_c} e^x \quad (4)$$

式中: $Z_c = \sqrt{(R_0 + j L_0) / (G_0 + j C_0)}$ 为线路波阻抗; $= \sqrt{(R_0 + j L_0) (G_0 + j C_0)}$ 为线路传播函数。

如果定义前行电压波 (简称前行波) $F = U + Z_c I$, 反行电压波 (简称反行波) $B = U - Z_c I$, 并且令 $A_x(\) = e^{-x}$, 根据式 (3)、式 (4) 不难推出: $F_x = A_x F_M; B_x = A_x B_M; U_x = (F_x + B_x) / 2; I_x = (F_x - B_x) / 2 Z_c$ 。说明前行波从保护安装点 M 沿线路正方向 (指向线路) 向 x 点传播, 反行波从 x 点沿线路反方向 (指向保护安装点 M) 传播至原点。线路上任意点的电压是前行电压波和反行电压波和的一半, 电流是前行电流波 (前行电压波除以波阻抗) 和反行电流波 (反行电压波除以负的波阻抗) 和的一半。根据行波理论, 如果线路上的初始行波已知, 就可以利用网格法分析故障线路的暂态过程。

2.2 故障线路的网格法分析

如图 1 所示, 有三条线路, SM, MN 和 NR , 线路 MN 是要研究的线路, 对于线路 MN 来说, $K1$ 为区内故障, $K2$ 为正向区外故障, $K3$ 为反向故障。我们将重点分析在区内、反方向以及正方向区外金属性短路故障时, 母线 M 处的故障暂态电压、电流、前行波、反行波的特征。

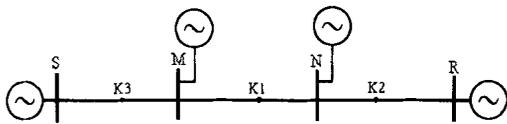


图 1 故障线路示意图

Fig. 1 The configuration of fault transmission line

2.2.1 区内故障

当在区内 $K1$ 点发生故障时, 根据叠加原理, 其故障附加网络相当于在 $K1$ 点接入一个与故障前大小相等方向相反的电源 E_k 如图 2(a) 所示。假设该电源透过故障点在线路上产生的初始行波为 S_0 , 并沿线路向母线 M 传播, 其传播方向与反行波的方向一致。由于研究线路为 MN , 因此线路 PM 和 NQ 连同母线 M 和 N 连接的元件等效为两个阻抗 Z_m 和 Z_n , 其行波网格如图 2(b) 所示。

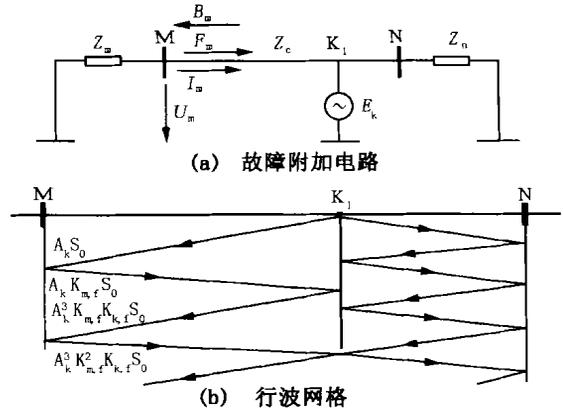


图 2 区内故障

Fig. 2 Internal fault

M 点的电压前行波 F_m 、反行波 B_m 、电压和电流在故障后的表达式如下

$$B_m = A_k S_0 + A_k^3 K_{m,f} K_{k,f} S_0 + \dots + A_k^{2n-1} K_{m,f}^{n-1} K_{k,f}^{n-1} S_0 + \dots = H_k(\) S_0 \quad (5)$$

$$F_m = A_k K_{m,f} S_0 + A_k^3 K_{m,f}^2 K_{k,f} S_0 + \dots + A_k^{2n-1} K_{m,f}^n K_{k,f}^{n-1} S_0 + \dots = K_{m,f} H_k(\) S_0 \quad (6)$$

$$U_m = (F_m + B_m) / 2 = K_u H_k(\) S_0 \quad (7)$$

$$I_m = (F_m - B_m) / 2 Z_c = K_i H_k(\) S_0 \quad (8)$$

式中: $K_{m,f}, K_{k,f}$ 分别为母线 M 和故障点 K 的反射系数; $H_k(\) = A_k / (1 - K_{m,f} K_{k,f} A_k^2)$; $K_u = (1 + K_{m,f}) / 2$ 为电压系数; $K_i = (K_{m,f} - 1) / 2 Z_c$ 为电流系数。

2.2.2 正方向区外故障

当在正方向区外 $K2$ 点发生故障时, 其故障附加网络相当于在 $K2$ 点接入一个附加电源 E_k , 如图 3(a) 所示。由于研究对象是线路 MN , 因此可以将附加电源和线路 NQ 等效为电源 $E_{eq} = A_2 E_k / (1 + A_2^2)$ 和阻抗 $Z_{eq} = (1 - A_2^2) Z_{c2} / (1 + A_2^2)$ (A_2 为故障点 $K2$ 到母线 N 的传播函数, Z_{c2} 为线路 NQ 的波阻抗) 串联的形式。假设等效电源透过母线 N 传播到线路上的初始行波为 S_0 , 其行波网格如图 3(b) 所示。

母线 M 处的暂态分量分别为

$$B_m = A_1 S_0 + K_{m,f} K_{n,f} A_1^3 S_0 + \dots + A_1^{2n-1} K_{m,f}^{n-1} K_{n,f}^{n-1} S_0 + \dots = H_1(\) S_0 \quad (9)$$

$$F_m = A_1 K_{m,f} S_0 + A_1^3 K_{m,f}^2 K_{n,f} S_0 + \dots + A_1^{2n-1} K_{m,f}^n K_{n,f}^{n-1} S_0 + \dots = K_{m,f} H_1(\) S_0 \quad (10)$$

$$U_m = (F_m + B_m) / 2 = K_u H_1(\) S_0 \quad (11)$$

$$I_m = (F_m - B_m) / 2 Z_c = K_i H_1(\) S_0 \quad (12)$$

式中: A_1 为从母线 N 传播到母线 M 的传播函数; $K_{m,f}, K_{n,f}$ 分别为母线 M 和母线 N 的反射系数;

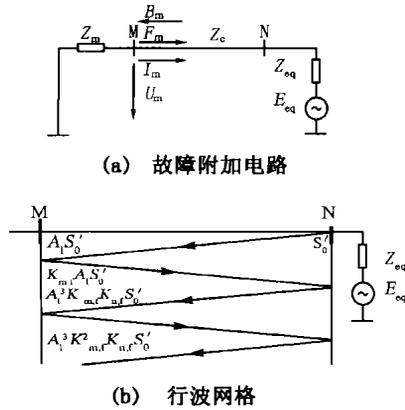


图3 正方向区外故障

Fig.3 Positive directional external fault

$$H_1(\omega) = A_1 / (1 - K_{m,f} K_{n,f} A_1^2)$$

2.2.3 反方向故障

当在反方向 K3 点故障时,将母线 M 外侧的有源网络用戴维南定理等效成电源 E_{eq} 与阻抗 Z_{eq} 串联的形式串接在母线 M 的外侧,其中 $E_{eq} = A_3 E_k / (1 + A_3^2)$, $Z_{eq} = (1 - A_3^2) Z_{c3} / (1 + A_3^2)$ (A_3 为故障点 K3 到母线 M 的传播函数, Z_{c3} 为其波阻抗)。假设等效电源透过母线 M 传播到线路上的初始行波为 S_0 ,其故障附加网络以及行波网络如图 4 所示。

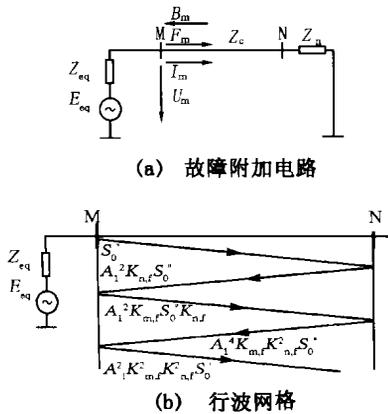


图4 反方向故障

Fig.4 Reverse directional external fault

M 侧的暂态前行波、反行波、电压和电流如下:

$$F_m = S_0 + A_1^2 K_{m,f} K_{n,f} S_0 + \dots + A_1^{2(n-1)} K_{m,f}^{n-1} K_{n,f}^{n-1} S_0 + \dots = H_1(\omega) S_0 \quad (13)$$

$$B_m = A_1^2 K_{n,f} S_0 + A_1^4 K_{m,f} K_{n,f}^2 S_0 + \dots + A_1^{2n} K_{m,f}^{n-1} K_{n,f}^n S_0 + \dots = A_1^2 K_{n,f} H_1(\omega) S_0 \quad (14)$$

$$U_m = (F_m + B_m) / 2 = K_u H_1(\omega) S_0 \quad (15)$$

$$I_m = (F_m - B_m) / 2 Z_c = K_i H_1(\omega) S_0 \quad (16)$$

式中: $H_1(\omega) = 1 / (1 - K_{m,f} K_{n,f} A_1^2)$; $K_u = (1 +$

$$A_1^2 K_{n,f}) / 2$$
; $K_i = (1 - A_1^2) / 2 Z_c$ 。

3 区内外故障时暂态分量比较

3.1 不同故障方向的比较

定义 $R_1 = B_m / F_m$, $R_2 = U_m / Z_m$, 从式(5) ~ 式(16)不难发现正方向和反方向故障时的差别。当正方向故障时, $|R_1| = |B_m / F_m| = |1 / K_{m,f}|$, $|R_2| = |U_m / I_m| = |(1 + K_{m,f}) Z_c / (K_{m,f} - 1)|$; 当反方向故障时, $|R_1| = |B_m / F_m| = |A_1^2 K_{n,f}|$, $|R_2| = |(1 + A_1^2 K_{n,f}) Z_c / (A_1^2 K_{n,f} - 1)|$, A_1 是线路的传播函数,它的作用主要是在时域内提供一个时间延迟 $T = l/v$, l 是线路 MN 的长度, v 是行波在线路 MN 上的传播速度,很明显, A_1^2 在时域内的时间延迟是 $2T$ 。取故障后 $[0, 2T]$ 的时间段,反方向故障时,因为 $A_1^2 = 0$,所以 $|R_1| = 0$, $|R_2| = Z_c$ 。正方向故障时, $|R_1| = |B_m / F_m| = |1 / K_{m,f}|$, $|R_2| = |U_m / I_m| = |(1 + K_{m,f}) Z_c / (K_{m,f} - 1)|$ 。

可见,不同方向故障时的差异是存在的,至于差异是否明显,在哪个频带内最明显,则取决于 M 侧的反射系数 $K_{m,f}$ 的频率特性,而反射系数的频率特性又与母线 M 的接线方式和母线 M 上连接的元件有关。

3.2 正方向区内外故障的比较

从式(5) ~ 式(12)发现,正方向区内外故障时各个暂态分量的差异表现在两个部分,一个是 $H(\omega)$,另一个是初始行波 S_0 。对于第一部分,假设故障点 K1 距离保护安装点 M 的距离为 x ,将传播函数 $A_k = e^{-j\omega x}$, $A_1 = e^{-j\omega l}$ 代入其中,则

$$|H_k(\omega)| = \left| \frac{A_k}{1 - K_{m,f} K_{k,f} A_k^2} \right| = \frac{e^{-\omega x}}{\sqrt{1 + |K_{m,f} K_{k,f}|^2 e^{-4\omega x} - 2 |K_{m,f} K_{k,f}| e^{-2\omega x} \cos(2\omega x + \kappa)}}$$

式中: κ 为 $K_{m,f} K_{k,f}$ 的相角。

$$|H_1(\omega)| = \left| \frac{A_1}{1 - K_{m,f} K_{n,f} A_1^2} \right| = \frac{e^{-\omega l}}{\sqrt{1 + |K_{m,f} K_{n,f}|^2 e^{-4\omega l} - 2 |K_{m,f} K_{n,f}| e^{-2\omega l} \cos(2\omega l + \iota)}}$$

式中: ι 为 $K_{m,f} K_{n,f}$ 的相角。

不难看出: $\frac{e^{-\omega x}}{1 + |K_{m,f} K_{k,f}|} |H_k| \frac{e^{-\omega x}}{1 - |K_{m,f} K_{k,f}|}$; $\frac{e^{-\omega l}}{1 + |K_{m,f} K_{n,f}|} |H_1| \frac{e^{-\omega l}}{1 - |K_{m,f} K_{n,f}|}$ 。根据反射系数常识可知,反射系数的模值随频率的改变在 $[0, 1]$ 之间

变化,因此 $|H_k|$ 和 $|H_l|$ 是随频率的改变而变化。根据传输线理论我们知道,是行波在线路上传输时的相位移参数, $1/v$,由于 v 接近光速,的值很小,因此相位 k 和 l 随频率在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 范围内的变动是导致其变化无常的主要原因。如果我们选择分析的频带刚好使 k 和 l 在 0 附近很小的范围内,那么 $|H_k(\omega)| = e^{-kx}/(1 - K_{m,f} K_{k,f})$, $|H_l(\omega)| = e^{-lx}/(1 - K_{m,f} K_{l,f})$ 。这样就有 $|H_k| \approx |H_l|$,由于 $1/v$ 的值也比较小,因此差别不是很大。

对于线路上的初始行波,当区内故障时, $|S_0| = |2Z_c E_k/(R_k + Z_c)|$, R_k 为故障过渡电阻,当金属性短路时, $|S_0| = |2E_k|$;区外故障时,由于 $|E_{eq}| = \left| \frac{2A_2 E_k}{(1 + A_2^2)} \right| = \left| \frac{2e^{-\alpha x} E_k}{\sqrt{1 + e^{-4\alpha x} + 2e^{-2\alpha x} \cos 2\alpha x}} \right|$, $|S_0| = |2e^{-\alpha x} E_k/(1 + e^{-2\alpha x})| \approx |E_k|$ 。因此, $|S_0| = |K_{n,z} E_{eq}| \approx |K_{n,z} E_k|$ 。可见,区内外故障时暂态分量的差异主要存在于初始行波之中,而在哪个频带内差异最为明显,取决于母线 N 的折射系数 $K_{n,z}$ 的频率特性,而母线 N 的折射系数与母线 N 的接线和连接的元件有关。

4 结论

经过比较分析,区内外故障时,在保护安装处(母线 M 处)的暂态分量的频谱确有差异,不同故障方向的差异为:正方向时 $|R_1| = |B_m/F_m| = |1/K_{m,f}| < 1$, $|R_2| = |U_m/I_m| = |(1 + K_{m,f})/(K_{m,f} - 1)| Z_c > Z_c$;而反方向故障时,在 $[0, 2T]$ 时间段内 $|R_1| = 0$, $|R_2| = Z_c$ 。正方向区内外故障差异主要体现在初始行波中,区内故障时, $|S_0| = |2Z_c E_k/(R_f + Z_c)|$,区外故障时, $|S_0| \approx |K_{n,z} E_k|$ 。区内外故障差异是否明显,在哪个频带内更明显,取决于线路边界折反射系数的频率特性。(待续)

参考文献:

- [1] 周泽昕,周春霞,王仕荣,等.微机线路保护装置在动模试验中出现的一些问题[A].第八届全国继电保护学术研讨会论文集[C].北京:2001,8:1-7.
- [2] 薄志谦.新一代电力系统继电保护——暂态保护[J].电网技术,1997,20(3):34-36.
- [3] 葛耀中.新型继电保护与故障测距原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,1996.184-215.
- [4] 董新洲,葛耀中,贺家李,等.输电线路行波保护的现状与展望[J].电力系统自动化,2000,24(10):56-61.
- [5] 董新洲,葛耀中,徐丙寅.输电线路故障暂态电流行波的故障特征及其小波分析[J].电工技术学报,1999,19(2):59-62.
- [6] Johns A T, Aggarwal R K, Bo Z Q. Nonunit Protection Technique for EHV Transmission Systems Based on Fault-generated Noise. Part 1: Signal Measurement [J]. IEE Proc Gener., Transm. Distrib, 1994, 141(2):137-140.
- [7] Bo Z Q. A New noncommunication Protection Technique for Transmission Lines[J]. IEEE trans. on Power Delivery, 1998, 13(4):1073-1078.
- [8] 哈恒旭,张保会,吕志来.利用暂态电流的输电线路单端暂态量保护探讨[J].中国电机工程学报,2000,20(11):56-61.
- [9] Marti J R. Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(1):147-155.
- [10] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M].北京:水利电力出版社,1991.

收稿日期: 2002-03-20

作者简介:

哈恒旭(1972-),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

张保会(1953-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护及通讯。

吕志来(1973-),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析。

The basic theories of boundary protection

Part I Fault transient analysis

HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, LV Zhi-lai

(Dept. of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

Abstract: In recent years, novel protection principle for transmission line based on single ended fault induced transients, we called Boundary Protection, have been developed using the high frequency band components. Two conditions are required for constructing the criterion of Boundary Protection: there must exist different characters between internal and external faults, and the information of different characters can be extracted largely enough to construct criterion. For such purpose, the spectrum of fault induced transients is analyzed here. The whole paper

(下转第 14 页)

表 1 实验系统的计算结果

Tab. 1 Computing results of experimental systems

系统节点数	33	69	135
投放节点数	3	2	4
网损减少量 (%)	35.8	34.3	34.1
最低点电压(前/后)/V	0.85/0.92	0.85/0.91	0.88/0.93

7 结论

本文针对配电网网络结构的辐射型特点,在文献[1]提出的功率矩模型的基础上,建立了配电网无功优化的精确矩模型,提出了配电网无功补偿的精确矩法。本方法以潮流计算为基础,计算无功一次、二次精确矩,并根据无功二次精确矩选择最佳补偿点,无功一次精确矩确定优化容量。其算法通过在三个实验系统进行验证,结果表明,此算法与无功近似矩相比更加精确,无论是降损还是提高电压水平效果都更显著,且算法简洁迅速,运算量较小,编程较易。此方法具有很强的实用性。

参考文献:

- [1] Cai Zhongqin, Guo Zhizhong. Reactive power moment method for optimal compensation on radial distribution systems[A]. POWERCON '98, Beijing, 1998:1435-1437.
- [2] 蔡中勤,郭志忠.基于逆流编号法的辐射型配电网牛顿法潮流[J].中国电机工程学报,2000,20(6):13-16.
- [3] 侯志俭,吴际舜,梁勇,等.配电网重构与电容器的配置[A].全国高等学校电力系统及其自动化专业第十一届学术年会论文集[C].1995:31-37.
- [4] Civanlar S, Grainger J J. Volt/Var Control on distribution systems with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. 1985, 104(11):3278-3297.

- [5] Chen YL. Weak Bus-Oriented Optimal Multi-objective VAR Planning[J]. IEEE Trans. on Power System. 1996, 11(4): 1885-1890.
- [6] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitors placement on radial distribution systems [J]. IEEE Trans. on Power Systems. 1989, 4(1):725-732.
- [7] Chiang Hsiao-dong, Wang Jir-cheng. Optimal capacitor placement in distribution system. Part I: A new formulation and the overall problem[J]. IEEE Trans on Power Delivery. 1990, 5(2):634-642.
- [8] Hsu Y Y, Yang C C. A hybrid artificial network dynamic programming approach for feeder capacitor scheduling[J]. IEEE Trans on Power Systems. 1994, 9(2):1069-1075.
- [9] Miu K N, Chiang Hsiao-Dong. Capacitor placement, replacement and control in large scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm[J]. IEEE Trans on Power System. 1996, 12(3):1160-1166.
- [10] Renato Cespedes G. New method for the analysis of distribution networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery. 1990, 5(1):391-396.
- [11] Baran M E, Wu F F. Optimal sizing of capacitors placed of radial distribution system [J]. IEEE Trans on Power Systems. 1989, 2(2):735-743.

收稿日期: 2002-03-28; 回修日期: 2002-04-25

作者简介:

矫志宏(1977-),女,硕士研究生,从事配电网自动化的研究工作;

蔡中勤(1973-),女,博士研究生,研究方向为配电网网络分析。

郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,从事电力系统分析与控制、计算机在电力系统中的应用及电力系统光学测量等技术的研究工作。

Accurate moment method for optimization of capacitors in radial distribution systems

JIAO Zhi-hong, CAI Zhong-qin, GUO Zhi-zhong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the radial structure of the distribution network operation, this paper proposes the concept of reactive accurate moment on the basis of reactive moment model. The optimal placement for capacitors is determined by reactive quadric accurate moment and the optimal sizing by reactive linear accurate moment. It's tested on experimental systems, and the result shows that the reactive accurate moment method is more efficient in both reducing the net loss and improving the voltage profiles than reactive approximate moment.

Key words: distribution network; reactive optimization; reactive accurate moment; reactive linear accurate moment; reactive quadric accurate moment

(上接第 10 页)

comprises three parts: fault transient analysis; reflective and refractive coefficient of line boundary spectrum analysis; the extraction of fault in formation and EMTP simulation tests. This paper is the first part, which theoretically analyzed the fault transients at single end and two different characters are discovered: the different character between positive and reverse directional fault is controlled by the reflective coefficient, and that between the internal and external fault at positive direction is controlled by refractive coefficient of line boundary.

Key words: fault induced transients; transmission line; positive and reverse direction; internal and external faults; reflective coefficient; refractive coefficient