

10 kV 配电网中性点不接地短路电流的分析

顾秀芳

(内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要: 传统的配电网故障分析中通常忽略了线路阻抗, 给短路电流计算带来误差。文中充分考虑故障线路阻抗, 利用对称分量法分析中性点不接地配电网短路电流的计算方法, 并讨论了影响短路电流的因素。通过理论及仿真实验得到故障点位置、故障线路参数及负荷对短路电流有较大的影响。

关键词: 配电网; 中性点不接地; 短路电流; 对称分量法; 仿真

Analysis on short-circuit current of 10 kV distribution network with neutral point ungrounded

GU Xiu-fang

(School of Electrical Engineering, Inner Mongolia Industrial University, Hohhot 010080, China)

Abstract: Line impedance is neglected traditionally when fault analysis on distribution network is made, which bring about difference for short-circuit current. Fault line impedance is fully taken into account in this paper, followed by discussion on some factors that affect short-circuit current. Theoretical analysis and simulation test have proved that factors, such as location of the fault point, parameter of faulted line, load and so on, have effects on short-circuit current to some extent.

Key words: distribution network; ungrounded neutral; short-circuit current; method of symmetrical components; simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)05-0014-05

0 引言

当前配电网采用的中性点运行方式有: 不接地、经消弧线圈接地、经低电阻接地等。不论何种接地方式, 都必须准确地计算单相接地短路电流, 以确定短路电流对系统造成的危害、消弧线圈的容量等^[1~4]。传统的短路电流分析中通常忽略线路阻抗, 但是随着配电网传输线路的延长, 电缆的引入使得这样的近似带来较大的计算误差。本文将充分考虑故障线路阻抗, 利用对称分量法从理论和仿真实验分析中性点不接地配电网单相短路电流的计算方法, 并从短路点的位置、非故障线路等方面讨论影响短路电流的因素。

1 传统配电网短路电流的计算分析

10 kV 配电网接线, 如图 1 (a) 所示。传统的短路电流分析方法中通常忽略线路阻抗, 则线路任意一点电压等于电源电压, 计算中不区分短路点的位置, 即故障线路上任何位置发生短路时电流均相同。如果在图 1 (a) K 点处发生 C 相接地故障, 依据叠加原理可以将短路情况看作正常运行 (图 1 (b)) 和故障运行 (图 1 (c)) 两部分的叠加^[5]。图 1 (b) 是正常运行状态下的三相系统, 将短接的相间电容去掉。由于

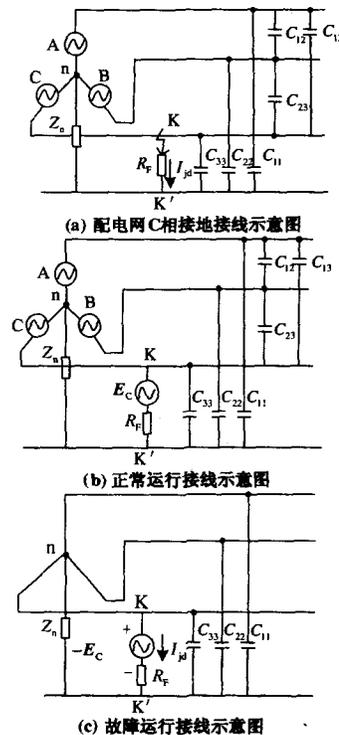


图 1 配电网 C 相短路叠加原理示意图

Fig.1 Superposition theoretical schematic diagram for C-phase ground fault on distribution network

三相对称,三相电容电流为 0,因而 KK' 间电流为零。图 1 (c) 为故障运行示意图,图中将正常的三相电源电动势短路,而在 KK' 间加一单相电动势 $-E_c$ 。此时三个相间电容被短接,对地电容并联接在 $-E_c$ 上,等值电路可简化为图 2。设: $C_{11}=C_{22}=C_{33}=C_0$ 。由于正常运行时三相电容电流及中性点电压均为零,因而 C 相故障后的短路电流和中性点的电压可以通过图 1 (c) 求得。

正常运行时由于三相电容电流为零,其分析方法与中性点不接地且接地电阻为零时相同。故障运行下的等值电路为:

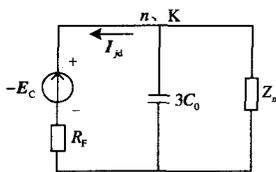


图 2 故障运行等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of faulted operation

由图 2 等值电路可得短路电流为:

$$I_{jd} = \frac{-E_c}{R_F + 1/(j3\omega C_0 + 1/Z_n)} = \frac{E_c(1 + j3\omega C_0 Z_n)}{R_F(1 + j3\omega C_0 Z_n) + Z_n} \quad (1)$$

在中性点不接地配电网中 $Z_n \rightarrow \infty$, 则短路电流为:

$$I_{jd} = -\frac{E_c}{R_F + 1/j3\omega C_0} \quad (2)$$

由图 1 (c) 可以看出,中性点 n 与 K 等同,则:

$$V_n = -E_c + I_{jd} R_F \quad (3)$$

非故障相电压 E_B' 等于图 1 (b) 和图 1 (c)

中电压的叠加得到:

$$E_B' = E_B + E_n \quad (4)$$

若配电网为中性点不接地系统,中性点电压 $V_n = -E_c + I_{jd} R_F$, 由于 $Z_n \rightarrow \infty$, 所以 I_{jd} 减小, V_n 幅值增大。

2 当前配电网故障分析

当前配电网的规模不断地发展,架空线路长度不断加长,配电线路总长可达 200 多公里,同时电缆的应用也越来越广泛。若在分析故障时仍然忽略线路阻抗,将会使故障电流及过电压的计算产生较

大的误差^[6]。

2.1 序网络的制作及分析

某配电网接线如图 3 所示,其中 T 对应变电站主变压器。将系统的容量看作无穷大,因而其等值阻抗近似为零。假设在 F 点处发生 c 相接地故障,应用对称分量法进行故障分析。

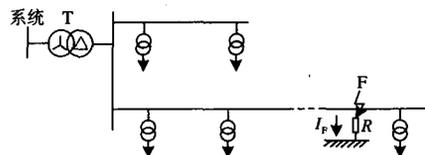


图 3 配电网接线示意图

Fig.3 Connection diagram of distribution network

正序电流的流通情况如图 4 所示。

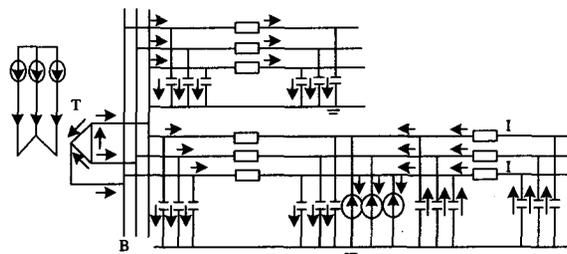


图 4 正序电流流通示意图

Fig.4 Flow diagram of positive-sequence current

正序网络等值电路如图 5 (a) 所示, F、H 分别表示故障线路和非故障线路,故障线路由故障点分为 I、II 两段,线路采用 π 型等值电路。

由于主变 T 的阻抗与线路相比很小将其忽略^[6]。为简化分析忽略非故障线路的阻抗。从外部电路看,线路对地电容与电源电势并联而忽略,从而得到图 5 (b) 所示的零序电流的流通情况如图 6 所示。

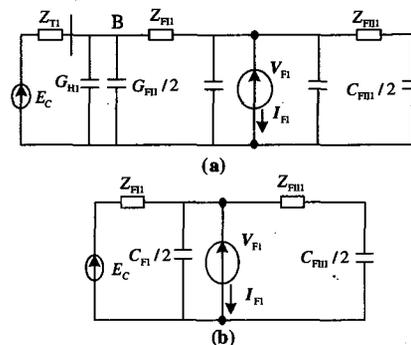


图 5 正序网等值电路及其化简形式

Fig.5 Equivalent circuit for sequence network and its simplification form

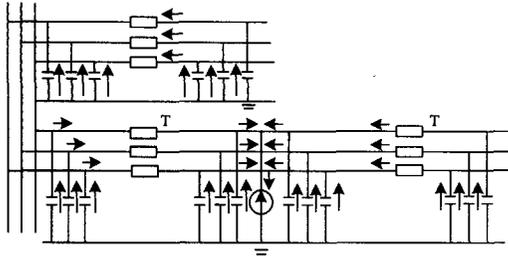


图 6 零序电流流通示意图

Fig.6 Flow schematic diagram of zero sequence current

零序等值电路如图 7 所示, 表征非故障线路的电容为 C_{H0} 。

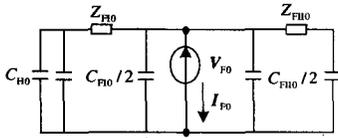


图 7 零序网等值电路

Fig.7 Equivalent circuit of zero sequence network

在图 5 和图 7 等值电路中, 下标 1、0 表示正序、零序, 而负序参数与正序相同。由对称分量法得到单相接地时的复合序网, 如图 8 所示。

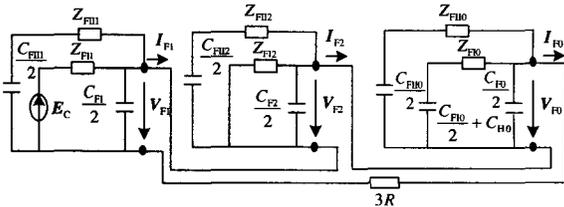


图 8 单相接地时复合序网图

Fig.8 Compound sequence diagram for line-ground fault

在传统的分析方法中, 忽略线路阻抗, 意味着在复合序网中只保留电源电动势及零序网络, 其等值电路如图 9 所示。其中 C_0 为配电网所有线路对地电容。

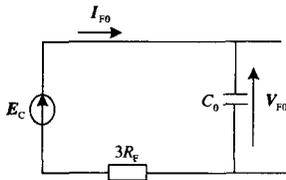


图 9 忽略线路阻抗后复合序网等值电路

Fig.9 Equivalent circuit of compound sequence network after neglecting line impedance

由此得零序电流 I_{F0} 及短路电流 I_{jd} 分别为:

$$I_{F0} = \frac{-E_C}{3R_F + 1/j\omega C_0} \quad (5)$$

$$I_{jd} = 3I_{F0} = \frac{E_C}{R_F + 1/j3\omega C_0} \quad (6)$$

考虑了电流定义方向的差异后, 与传统分析方法计算短路电流用到的公式 (2) 相同。

2.2 单相短路电流的计算

正序网从短路端口看进去的等值导纳为:

$$Y_{1\Sigma} = \frac{1}{Z_{F1}} + j\omega C_{F1}/2 + \left(\frac{1}{Z_{F11} + \frac{1}{j\omega C_{F11}/2}} \right) = \frac{2(Z_{F11} * j\omega C_{F11} + 2) + j\omega C_{F1}(Z_{F11} * j\omega C_{F11} + 2)Z_{F1}}{2Z_{F1}(Z_{F11} * j\omega C_{F11} + 2)} + \frac{j2\omega C_{F11}Z_{F11}}{2Z_{F1}(Z_{F11} * j\omega C_{F11} + 2)} \quad (7)$$

定义: $k = \frac{l_{F1}}{l_F}$, 则 $\frac{l_F - l_{F1}}{l_F} = \frac{l_{F11}}{l_F} = 1 - k$, 并忽略

$k(1-k)^2$ 及 C^2 项。K 表征故障点的位置, 由此得到故障线路 $Z_{F11} = kZ_{F1}$, $Z_{F111} = (1-k)Z_{F1}$, $C_{F11} = kC_{F1}$, $C_{F111} = (1-k)C_{F1}$, 其中 Z_{F1}, C_{F1} 为故障线路的总阻抗和总电容。正序网从短路端口看进去的等值导纳为:

$$Y_{1\Sigma} = \frac{j\omega Z_{F1} C_{F1} + 2}{2kZ_{F1}}$$

正序等值阻抗为:

$$Z_{1\Sigma} = \frac{1}{Y_{1\Sigma}} = \frac{2kZ_{F1}}{j\omega Z_{F1} C_{F1} + 2} \quad (8)$$

零序网从短路端口看进去的等值导纳:

$$Y_{0\Sigma} = \frac{1}{Z_{F0} + \frac{1}{j\omega(C_{F0}/2 + C_{H0})}} + j\omega C_{F0}/2 + \left(\frac{1}{Z_{F00} + \frac{1}{j\omega C_{F00}/2}} \right) = \frac{j2\omega C_0}{j\omega Z_{F0}[(2k^2 - 2k + 1)C_{F0} + 2kC_{H0}] + 2}$$

其中: C_0 为配电网总电容。零序等值阻抗为:

$$Z_{0\Sigma} = \frac{j\omega Z_{F0}[(2k^2 - 2k + 1)C_{F0} + 2kC_{H0}] + 2}{j2\omega C_0} \quad (9)$$

从而得短路电流正序分量为:

$$I_1 = \frac{E}{\frac{4kZ_{F1}}{j\omega C_{F1} + 2} + \frac{jZ_{F0}\omega[(2k^2+1-2k)C_{F0}+2kC_{H0}]+2}{j2\omega C_0}} \quad (10)$$

设 $a = \omega[(2k^2+1-2k)C_{F0}+2kC_{H0}]$, $Z_{F1} = R_{F1} +$

jX_{F1} , $Z_{F0} = R_{F0} + jX_{F0}$, 则:

$$I_1 = \frac{E}{\frac{4k(R_{F1} + jX_{F1})}{j\omega C_{F1}(R_{F1} + jX_{F1}) + 2} + \frac{j(R_{F0} + jX_{F0})a + 2}{j2\omega C_0}}$$

设: $\frac{R_{F1}}{R_{F0}} = m$, $\frac{X_{F1}}{X_{F0}} = n$, $\frac{C_{F1}}{C_{F0}} = p$ ($m, n < 1$), 在无

架空地线的配电网中, $n < 0.3$, $m, n < 1$, 则:

$$I_1 = \frac{E}{\frac{4kmR_{F0} + j4knX_{F0}}{(-\omega p C_{F0} X_{F0} + 2) + j\omega m p R_{F0} C_{F0}} + \frac{j(-2 + aX_{F0}) + aR_{F0}}{2\omega C_0}} \quad (11)$$

单相接地短路电流为 $3I_1$, 其变化规律与正序电流相同。为讨论短路电流幅值, 将式 (11) 表示为式 (12)。

$$I_1^2 = \left[\frac{(8k\omega m C_0 R_{F0} + 2\omega m p C_{F0} R_{F0} + 2aR_{F0})^2}{(4\omega C_0 E)^2} + \frac{(8k\omega m C_0 X_{F0} + 2aX_{F0} - 4 + 2\omega m p C_{F0} X_{F0})^2}{(4\omega C_0 E)^2} \right]^{-1} \quad (12)$$

3 影响短路电流的因素分析

3.1 故障线路类型对短路电流的影响

配电网现已广泛采用电缆, 与架空线相比较, 电缆的正序容抗较架空线大约 40 倍, 而电缆的正序电抗约为架空线的 1/4 倍。公式中 $nC_{F0} = C_{F1}$, C_{F1} (或 C_{F0}) 数值的变化对分母的影响更大, 因而采用电缆将使短路电流更小。

3.2 故障位置对短路电流的影响

在公式 (12) 中, 设

$$a = \omega[(2k^2+1-2k)C_{F0}+2kC_{H0}] = \omega[(k-1)^2+k^2]C_{F0}+2kC_{H0}$$

考虑 $(k-1)^2+k^2$ 可得:

(1) $1/2 < k < 1$ 时, $(k-1)^2+k^2$ 、 a 随着 k 的增大而增大, 从而使 I 减小。即在线路后半段发生故障时, 随着短路点远离变电站母线, 短路电流呈现下降的趋势。

(2) $0 < k < 1/2$ 时, $(k-1)^2+k^2$ 会随着 k 的增大而减小, 因而无法确定 I_1 的变化规律, 此时需要考虑 I 的表达式。为简化分析, 将式 (12) 改写为:

$$I_1^2 = \frac{S}{(Ak+B+Ca)^2+(Dk+E+Fa)^2} \quad (13)$$

其中:

$$S = (4\omega C_0 E)^2, A = 8\omega m C_0 R_{F0}, B = 2\omega m p C_{F0} R_{F0}, C = 2R_{F0}, F = 2X_{F0}, D = 8\omega n C_0 X_{F0},$$

$E = -4 + 2\omega m p C_{F0} X_{F0}$, A, B, C, D, E, F, S 均是常数。其中 $E < 0$, 其它系数均 > 0 。在式 (13) 中, 考虑其分母

$$f(k) = (Ak+B+Ca)^2 + (Dk+E+Fa)^2 \quad (14)$$

$f(k)$ 的导数为:

$$f'(k) = 2(Ak+B+Ca)(A+Ca') + 2(Dk+E+Fa)(D+Fa') \quad (15)$$

其中: $a' = \omega(4k-2)C_{F0} + 2C_{H0}$

通常非故障线路总电容大于故障线路电容, 即 $C_{H0} > C_{F0}$, 所以 $a' > 0$ 。若 $f'(k) > 0$, 即:

$$(Ak+B+Ca)(A+Ca') + (Dk+E+Fa)(D+Fa') > 0$$

由于 $\omega^2 C^2$ 项很小将其忽略, 得:

$$16\omega n C_0 X_{F0} + 8X_{F0}\omega[(4k-2)C_{F0} + 2C_{H0}] < 0$$

从而 $k < \frac{\omega(C_{F0} - C_{H0}) - \omega n C_0}{2\omega C_{F0}} < 0$ 。即在

$0 < k < 1/2$ 区间内, $f'(k) < 0$, 则随着 k 的增加, I_1 有下降的趋势。这样在整个 $0 < k < 1$ 的区间内, 短路电流的幅值将随着短路点远离变电站母线而下降。

3.3 非故障线路对短路电流的影响

在式 (12) 中 C_0 代表所有线路的总电容, 其数值等于故障线路与非故障线路电容之和, 即: $C_0 = C_{H0} + C_{F0}$, 由于 C 的数量级很小, 分子和分母的第一项中电容 C_{H0} 的变化与 4 相比, 可以认为是微小的。或者通过对 $f^2(C_{H0})$ 函数求导数发现, 其导数在 10^{-14} 数量级上, 所以由 C_{H0} 引起的短路电流的变化非常小。

4 仿真实验分析

为验证本文的结论,应用 Matlab 对中性点不接地配电网短路电流进行仿真分析。网络接线如图 10 所示,与配电网相连的系统看作无穷大系统。变压器和线路参数如表 1 所示,Matlab 仿真图如图 11 所示。

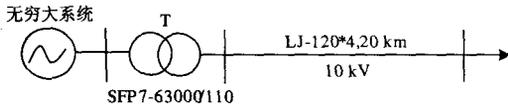


图 10 某配电网接线示意图

Fig.10 Connection schematic diagram of a distribution network

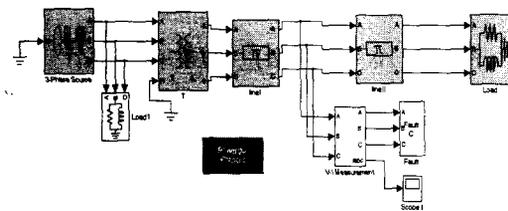


图 11 单相短路电流仿真模型图

Fig.11 Simulation model diagram for line-ground fault

为分析不同因素对短流的影响,本文从故障点位置、非故障线路阻抗及回路数、故障线路参数、负荷四个方面进行仿真,并验证相关理论分析。仿真实验 1~3 中,不考虑末端负载的影响,即认为线路空载,仿真中用吸收功率很小的并联 RLC 负载表示。

实验 1: 故障位置对短路电流的影响

表 1 仿真模型中网络参数表

Tab.1 Network parameters in simulation model

参 数	变压器 (归算到高压侧)				线路/km					
	电阻	电抗	电导	电纳	电阻/ Ω		电抗/ Ω		电纳 ($\times 10^{-6}$)/S	
	/ Ω		/S		正序	零序	正序	零序	正序	零序
	0.7744	20.17	4.17e-6	3e10-5	0.27	0.42	0.342	1.193	3.30	1.65

表 2 $Z_F=0$ 与 $Z_F \neq 0$ 在不同短路位置下的短路电流仿真数据

Tab.2 Simulation data of short-circuit current at different faulted point when $Z_F=0$ and $Z_F \neq 0$ respectively

位置/km	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
短路电 流/kA	$Z_F \neq 0$	11.7	5.8	2.9	1.95	1.45	1.2	0.95	0.8	0.75	0.65
	$Z_F=0$	250									

表 3 不同故障线路类型时短路电流的仿真数据

Tab.3 Simulation data of short-circuit current at different types of faulted line

位置/km	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
短路电 流/kA	架空线路	11.7	5.8	2.9	1.95	1.45	1.2	0.95	0.8	0.75	0.65
	电缆线路	8	4	2	1.6	1.05	0.83	0.69	0.6	0.53	0.45

选取不同的短路点位置,其数值由短路点与变电站母线之间的距离来确定。包括故障线路在内共有四条线路,各为 20 km。比较故障线路阻抗 $Z_F=0$ 和 $Z_F \neq 0$ 时对故障电流的影响,仿真数据如表 1 所示。仿真表明: $Z_F=0$ 时短路电流均相同,且数值较 $Z_F \neq 0$ 大。 $Z_F \neq 0$ 时,不同故障点时短路电流有较大差别,且随着短路点远离变电站母线,短路电流呈下降趋势。

实验 2: 非故障线路对短路电流的影响

仿真表明:非故障线路的阻抗及回路数对短路电流的影响很小。

实验 3: 故障线路参数对短路电流的影响

为比较故障线路采用架空线与电缆时短路电流的差异,实验采用相同长度、相同载流面积的架空线和电缆线路做比较,仿真数据如表 3 所示。仿真表明:相同短路位置下,电缆的短路电流较架空小。

实验 4: 负荷对短路电流的影响

作为理论分析的补充,讨论负荷对短路电流的影响。故障线路接有不同负荷时的仿真数据如表 4 所示。通过仿真发现:非故障线路的负荷对短路电流的影响很小,而故障线路则相反。这主要因为正序网络中忽略了变压器阻抗后,非故障线路负荷支路与恒电动势的电源并联,零序网络中由于负载通常接为 Y 而不能流通零序电流。而故障线路的负荷则在正、负、零序网均有所反映,因而对短路电流造成影响。随着故障线路负荷的增加,短路电流呈现下降趋势。

- Using FFT Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(6):50-54.
- [14] 陈冬红. 电力系统谐波测量和分析方法研究(硕士学位论文)[D]. 南京:河海大学, 2005.
CHEN Dong-hong. Research of the Methods for Measurement and Analysis on Power System Harmonics, Thesis[D]. Nanjing:Hohai University, 2005.
- [15] 严登俊,袁洪,高维忠,等.利用以太网和 ATM 技术实现电网运行状态实时监测[J]. 电力系统自动化,2003,27(10): 67-69.
YAN Deng-jun,YUAN Hong,GAO Wei-zhong,et al. Real-time Monitoring System for the States of Power Network Over Ethernet and ATM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10):67-69.
- [16] 李建,谢小荣,韩英铎. 同步相量测量的若干关键问题[J]. 电力系统自动化, 2005,29(1):45-48.
LI Jian,XIE Xiao-rong,HAN Ying-duo. Some Key Issues of Synchrophasor Measurement[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(1):45-48.
- [17] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
HU Guang-shu. Digital Signals Process-theory, Arithmetic and Achieve[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 1997.

收稿日期: 2007-08-06; 修回日期: 2007-09-28

作者简介:

杨力森(1970-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事电力自动化系统的研究工作; E-mail: ylsyls@ctgu.edu.cn

汪芳宗(1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事电网一体化计算及并行分布式处理的研究工作;

孙水发(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事信息处理的研究工作。

(上接第 18 页 continued from page 18)

表 4 故障线路接有不同负荷时短路电流仿真数据

Tab.4 Simulation data of short-circuit current at different load of faulted line

负荷/VA		1+j2	50+j10	500+j100	(2+j1)*10 ⁵	(2+0.9)*10 ⁶
短路电流/kA	$I_F=10/\text{km}$	11.6	1.16	1.16	1.18	1.23

4 结语

配电网中短路电流的计算是确定中性点运行方式、绝缘配合、保护方式等方面的重要依据。在传统的计算中通常不考虑线路阻抗,这使得理论计算数据偏大。随着配电线路的不断增长,这种近似所带来的误差将会越来越大。本文充分考虑了线路阻抗的影响,利用对称分量法分析了单相短路电流的计算方法,并从理论和仿真的角度分析了故障位置、非故障线路及参数对短路电流的影响,最后通过仿真对负荷的影响做了初步的分析。为简化分析,本文对变压器的阻抗、负荷、非故障线路的阻抗做了近似处理。为更详尽地讨论配电网在不同接地方式下的短路电流的特性,还应建立更加完善的数学模型。

参考文献

- [1] 陈维江,蔡国雄. 10kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 56-60.
CHEN Wei-jiang, CAI Guo-xiong. Neutral Grounding Mode in 10kV Distribution Network via Peterson Coil with Parallel Resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28 (12): 56-60.
- [2] 曾祥君,尹项根. 配电网中性点接地方式改造探讨[J]. 电工技术杂志, 2002, (10): 5-8.
ZENG Xiang-jun,YIN Xiang-gen. Discussion for Transformation of Neutral Grounding Method MV

Networks[J]. Transation Society,2002, (10): 5-8.

- [3] 张慧媛,丁杨. 城市电网中性点经电阻接地方式的应用探讨[J]. 高压电器, 1997, (1): 32-35.

ZHANG Hui-yuan, DING Yang. Application Discussion on Neutral Grounding Mode via Resistance on Urban Power Network[J]. High Voltage Unit, 1997, (1): 32-35.

- [4] 倪虹妹,周军. 电网中性点经电阻接地浅析[J]. 江西水利科技, 2004, 30 (5): 115-117.

NI Hong-mei, ZHOU Jun. Primary Discussion on Neutral Grounding Mode via Resistance of Network[J]. Science and Technology of Jiangxi Water Power, 2004, 30 (5): 115-117.

- [5] 陈慈萱. 过电压保护原理与运行技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.

CHEN Ci-yuan. Over-voltage Protection Theory and Operating Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press,2002.

- [6] Gatta F M, Geri A. Analytical Prediction of Abnormal Temporary Over-voltage due to Ground Faults in MV Networks[J]. Electric Power System Research,2007, 77(10):1305-1313.

收稿日期: 2007-10-26; 修回日期: 2007-12-04

作者简介:

顾秀芳(1974-), 女, 硕士, 从事电力系统分析及配电网自动化及其远程监控的教学和研究工作。E-mail: gxfhelo@sina.com