

特高压交流 1000 kV 示范工程故障电流谐波分析

王锐¹, 李瑞生², 李文霞³, 王莉²

(1. 河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;

3. 河南驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 根据国家电网公司提供的交流特高压示范工程二次系统研究用关键参数与边界条件, 采用输电线路分布参数法, 理论计算晋东南—南阳—荆门交流示范工程充电合闸、不同位置故障的电流谐波分布, 了解特高压 1 000 kV 交流输电短路过渡过程可能出现的现象及对继电保护的影响, 对 1 000 kV 交流示范工程的继电保护研究具有一定的指导意义。

关键词: 1000 kV 交流输电; 故障; 谐波; 示范工程

Fault current harmonic analysis of 1000 kV UHV AC power transmission demonstration project

WANG Rui¹, LI Rui-sheng², LI Wen-xia³, WANG Li²

(1. Henan Power Grid Group Co., Ltd, Zhengzhou 450052, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China;

3. Zhumadian Power Supply Branch, Henan Power Grid Group Co., Ltd, Zhumadian 463000, China)

Abstract: According to the parameter and boundary conditions of the 1000 kV UHV AC power transmission demonstration project provided by State Grid Corporation of China, this paper uses transmission line distributed parameter method, computes theoretically the current harmonic of charging current turn-on, fault in different locating in Southeastern in Shanxi Province via Nanyang in Henan Province to Jingmen in Hubei Province of the 1000 kV UHV AC power transmission demonstration project. This result shows that those phenomena occurred in demonstration project short circuit transition processing, and the effect on relay protection. It is useful for relay protection in the 1000 kV UHV AC power transmission demonstration project.

Key words: 1000 kV AC power transmission; fault; harmonic; demonstration project

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)23-0001-04

0 引言

交流长线远距离输电, 由于输电线路为分布参数, 在短路的暂态过程中, 会出现不同频段的高频分量, 频率越高幅值越小。特高压 1 000 kV 交流输电, 由于交流 1 000 kV 系统特征是单位电阻小, 单位电阻与单位电感比值小, 分布电容大, 在短路的暂态过程中, 高频分量向基波靠近。短路计算采用集中参数时, 高频分量个数取决于等效的 T 型或 II 型网络的个数, 采用的 T 型或 II 型网络个数越多, 越逼近分布参数, 计算得到的高频分量的个数由最低频率到最高频率越准确。采用两个以上 T 型或 II 型网络, 用拉氏变换法求高阶微分方程越困难。采用输电线路分布参数法, 虽然求解过程比较复杂, 但是可以更精确计算短路暂态过程中高频分量^[1], 更清楚了解特高压 1 000 kV 交流输电短路的过渡过程可能出现的现象及对继电保护的影响。

1 1000 kV 示范工程已知参数

交流 1000 kV 示范工程系统图如图 1 所示, SR1—SR4 为并联电抗器, 计算荆门侧充电合闸, 南阳 k1 点三相短路、晋东南出口 k2 点三相短路荆门侧故障电流谐波, 参照文献[2]中的方法, 荆门侧电源用恒定电势和等价阻抗处理; 变压器、电抗器用感抗元件处理; 输电线路用分布参数处理。对于其它的不对称故障, 假定电网是线性网络, 可以用对称分量的概念处理。如表 1 为 1000 kV 示范工程输电线路参数, 表中: X_{S1} 、 X_{S2} 分别为大方式下经折算荆门侧及晋东南侧系统等值阻抗; r_1 、 g_1 、 L_1 、 C_1 是荆门到南阳线路每公里电阻、电导、感抗、电容; l_1 是荆门到南阳线路长度; r_2 、 g_2 、 L_2 、 C_2 是晋东南到南阳线每公里的电阻、电导、电感、电容; l_2 是晋东南到南阳的线路长度;

L_{p1} 、 L_{p2} 、 L_{p3} 、 L_{p4} 依次为荆门—南阳—晋东南 并联电抗器感抗。

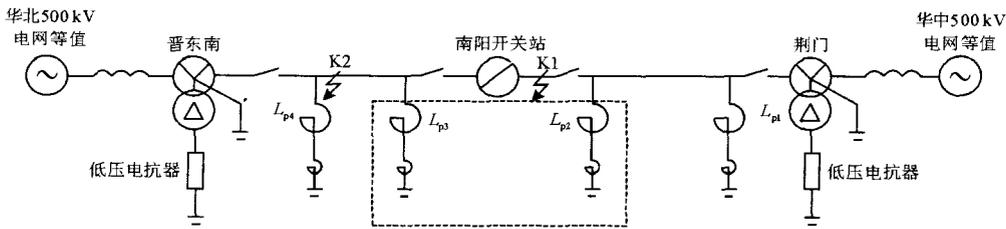


图 1 交流 1000 kV 示范工程系统图

Fig.1 1000 kV AC Power transmission demonstration project system

表 1 1000 kV 示范工程输电线路参数

Tab.1 1000 kV AC Power transmission demonstration project parameter

荆门-南阳		南阳-晋东南	
X_{s1}	9.096 Ω	X_{s2}	9.79 Ω
r_1	0.00801 Ω/km	r_2	0.00758 Ω/km
L_1	0.2631 Ω/km	L_2	0.26365 Ω/km
g_1	0.0 s/km	g_2	0.0 s/km
C_1	0.01383 $\mu\text{F}/\text{km}$	C_2	0.013970 $\mu\text{F}/\text{km}$
l_1	291 km	l_2	363 km
L_{p1}	2016 Ω	L_{p3}	1680 Ω
L_{p2}	1680 Ω	L_{p4}	12600 Ω

始角， p 为运算子符号。

$$Z_1(p) = W_1(p) \text{th} \left[\frac{1}{2} \gamma_1(p) l_1 \right] \quad (1)$$

$$Y_1(p) = \frac{1}{W_1(p)} \text{sh} [\gamma_1(p) l_1] \quad (2)$$

$$Z_2(p) = W_2(p) \text{th} \left[\frac{1}{2} \gamma_2(p) l_2 \right] \quad (3)$$

$$Y_2(p) = \frac{1}{W_2(p)} \text{sh} [\gamma_2(p) l_2] \quad (4)$$

特高压输电线路中 $r_1 \approx 0$ 、 $g_1 \approx 0$ 、 $r_2 \approx 0$ 、 $g_2 \approx 0$ ，

则运算波阻抗为

$$W_1(p) = \sqrt{\frac{r_1 + pL_1}{g_1 + pC_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = Z_{c1} \quad (5)$$

$$W_2(p) = \sqrt{\frac{r_2 + pL_2}{g_2 + pC_2}} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = Z_{c2} \quad (6)$$

运算分布系数为：

$$\gamma_1(p) = \sqrt{(r_1 + pL_1)(g_1 + pC_1)} = \sqrt{L_1 C_1} p \quad (7)$$

$$\gamma_2(p) = \sqrt{(r_2 + pL_2)(g_2 + pC_2)} = \sqrt{L_2 C_2} p \quad (8)$$

$$\gamma_1(p) l_1 = \sqrt{L_1 C_1} p l_1 = \gamma_1 p \quad (9)$$

$$\gamma_2(p) l_2 = \sqrt{L_2 C_2} p l_2 = \gamma_2 p \quad (10)$$

2 线路充电合闸电流暂态计算

2.1 不带并联电抗器充电合闸

如图 2 为不带并联电抗器，晋东南断路器断开时荆门侧充电合闸网络图。图中 $Z_1(p)$ 、 $Y_1(p)$ 为荆门—南阳线路等价 T 回路的两臂感抗和中点对地导纳的运算表达式； $Z_2(p)$ 、 $Y_2(p)$ 为晋东南—南阳线路等价 T 回路的两臂感抗和中点对地导纳的运算表达式； $E(p)$ 、 $X_s(p)$ 为荆门侧等价电势和系统阻抗。

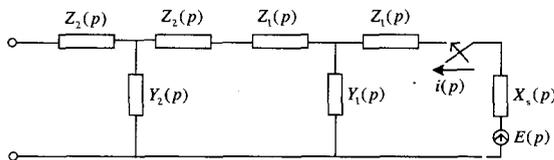


图 2 不带并联电抗器充电合闸网络图

Fig.2 Charging current turn-on network without parallel connection reactance

设 $e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta)$ ，则 $E(p) = \frac{E_m e^{j\theta}}{p - j\omega}$ ，

$X_s(p) = X_s \frac{p}{\omega}$ ，其中 ω 为电源角频率， θ 为电压初

式 (5)、(6) 中波阻抗 $Z_{c1} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ 、 $Z_{c2} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$ 为

常数，式 (9)、(10) 中 $\gamma_1 = \sqrt{L_1 C_1} l_1$ 、 $\gamma_2 = \sqrt{L_2 C_2} l_2$ 为电磁波沿无损耗线传播所需的时间。

从源 $E(p)$ 处看到的综合运算导纳：

$$Y_g(p) = \frac{Z_{c1} \text{th}[\gamma_2 p] + Z_{c2} \text{th}[\gamma_1 p]}{Z_{c1} Z_{c2} + Z_{c1}^2 \text{th}[\gamma_1 p] \text{th}[\gamma_2 p] + Z_{c1} X_s \frac{p}{\omega} \text{th}[\gamma_2 p] + Z_{c2} X_s \frac{p}{\omega} \text{th}[\gamma_1 p]} \quad (11)$$

因 $I(p) = Y_g(p) \times U(p)$, 所以合闸充电时的自由衰减分量可由解 $Y_g(p)$ 分母的根求得。取 $p = j\omega_n$, 代入 $Y_g(p)$ 的分母中, 并令该分母为零,

$$f(p) = Z_{c1} Z_{c2} - Z_{c1}^2 \text{tg}(\gamma_1 \omega_n) \text{tg}(\gamma_2 \omega_n) - Z_{c1} X_s \frac{\omega_n}{\omega} \text{tg}(\gamma_2 \omega_n) - Z_{c2} X_s \frac{\omega_n}{\omega} \text{tg}(\gamma_1 \omega_n) = 0 \quad (12)$$

以纵坐标为 $f(p)$ 、横坐标为 ω 的图解法求解方程 (12), 如图 3, 可得高频分量谐波依次为 $\omega_1 = 1.458\omega$ 、 $\omega_2 = 5.1\omega$ 、 $\omega_3 = 9.3\omega$ 、 $\omega_4 = 13.68\omega$ 、 $\omega_5 = 18.1\omega$ 。

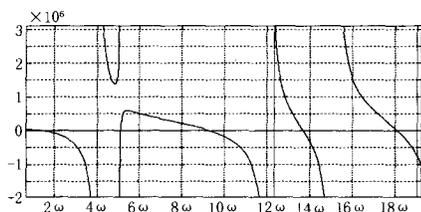


图 3 不带并联电抗器充电合闸求解

Fig.3 The frequency solution of charging current turn-on without parallel connection reactance

2.2 带并联电抗器

如图 4 为带并联电抗器, 晋东南断路器断开时荆门侧充电合闸网络图。

求得解自由分量 ω_n 的一个超越方程 $f(p)$, 因 $\text{th}jx = j\text{tg}x$, 可得

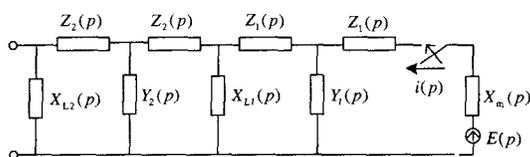


图 4 带并联电抗器充电合闸网络图
Fig.4 Charging current turn-on network with parallel connection reactance

其中运算阻抗 $X_m(p) = X_m \frac{p}{\omega}$, X_m 是荆门侧系统阻抗 X_{S1} 与并联电抗器 L_{p1} 的并联等价阻抗;

$X_{L1}(p) = X_{L1} \frac{p}{\omega}$, X_{L1} 是并联电抗器 L_{p2} 、 L_{p3} 并

联等价阻抗; $X_{L2}(p) = X_{L2} \frac{p}{\omega}$, 是并联电抗器 L_{p4}

阻抗; 其它同图 2 相同的表示。同 2.1 的方法, 求得解自由分量 ω_n 的一个超越方程 $f(p)$ 。

$$f(p) = \text{tg}[\gamma_1 \omega_n] \text{tg}[\gamma_2 \omega_n] \left\{ Z_{c2} X_m X_{L1} \frac{-\omega_n^2}{\omega^2} + Z_{c1}^2 \left(Z_{c2} - X_{L1} X_{L2} \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right) \right\} +$$

$$\text{tg}[\gamma_2 \omega_n] \left\{ Z_{c1} Z_{c2} X_{L1} \frac{\omega_n}{\omega} + Z_{c1} X_m \frac{\omega_n}{\omega} \left(Z_{c2} - X_{L1} X_{L2} \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right) \right\} +$$

$$\text{tg}[\gamma_1 \omega_n] \left\{ Z_{c1}^2 Z_{c2} (X_{L1} + X_{L2}) \frac{\omega_n}{\omega} + Z_{c2} X_m X_{L1} X_{L2} \frac{-\omega_n^3}{\omega^3} \right\} +$$

$$Z_{c1} Z_{c2} \{ X_{L1} X_{L2} + X_m (X_{L1} + X_{L2}) \} \frac{\omega_n^2}{\omega^2} = 0 \quad (13)$$

图解法求解方程 (13), 如图 5, 可得高频分量谐波依次为 $\omega_1 = 0$ 、 $\omega_2 = 1.68\omega$ 、 $\omega_3 = 5.15\omega$ 、 $\omega_4 = 9.38\omega$ 、 $\omega_5 = 13.7\omega$ 、 $\omega_6 = 18.12\omega$ 。

2.3 K1 点三相短路

采用叠加原理把故障状态分为故障前状态和故

障附加状态。如图 6 为 k1 点三相短路荆门侧故障附加状态网络图。仅分析计算荆门侧故障分量电流谐波特征, 故障电流为故障分量电流与故障前负荷电流的叠加, 故障分量电流谐波即为故障电流的谐波, 晋东南侧电流谐波特征可采用相同的方法分析。

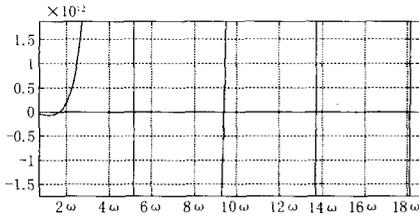


图 5 带并联电抗器充电合闸求解

Fig.5 Three short circuit fault appending state

如图 6 故障点在故障前的电压是

$U(t) = U_m e^{j(\omega t + \theta)}$, 其运算表达式为

$$U(p) = \frac{U_m e^{j\theta}}{p - j\omega}, \quad Z_1(p), Y_1(p), X_m(p)$$

同 2.1、2.2, $I(p)$ 为荆门侧故障分量电流, 由故障点看到的综合运算导纳 $Y_g(p)$ 为

$$Y_g(p) = \frac{1 + X_m \frac{p}{\omega} \cdot \frac{\text{th}[\gamma_1 p]}{Z_{c1}}}{X_m \frac{p}{\omega} + Z_{c1} \text{th}[\gamma_1 p]} \quad (14)$$

求得解自由分量 ω_n 的一个超越方程 $f(p)$

$$f(p) = \frac{X_m}{\omega} \cdot \frac{\omega_n}{Z_{c1}} + \text{tg}(\gamma_1 \omega_n) = 0 \quad (15)$$

图解法求解方程 (15), 如图 7, 可得高频分量谐波依次为 $\omega_1 = 0$ 、 $\omega_2 = 6.27\omega$ 、 $\omega_3 = 15.66\omega$ 。

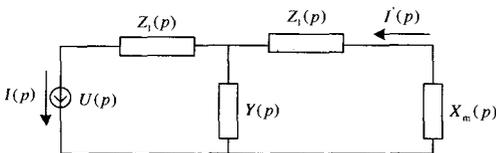


图 6 k1 三相短路荆门侧故障附加状态网络图

Fig.6 Three short circuit fault appending state network in k1

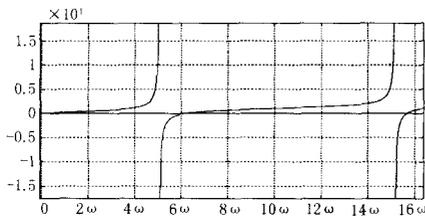


图 7 k1 点三相短路求解

Fig.7 The frequency solution for three phase short circuit occurred in k1

2.4 K2 点三相短路

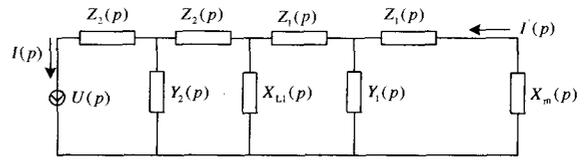


图 8 K2 短路荆门侧故障附加状态网络图

Fig.8 Three short circuit fault appending state network in k2

图 8 为荆门侧故障附加状态网络图, 其它参数同前所述。同 2.3 的方法, 该情况下求得解自由分量 ω_n 的一个超越方程 $f(p)$ 。

$$f(p) = Z_{c2} \left(Z_{c1} + \frac{X_m X_{L1} p^2}{Z_{c1} \omega^2} \right) \text{th}(\gamma_1 p) \text{th}(\gamma_2 p) + Z_{c1} X_{L1} \frac{p}{\omega} \text{th}(\gamma_1 p) + Z_{c2} (X_m + X_{L1}) \frac{p}{\omega} \text{th}(\gamma_2 p) + X_{L1} X_m \frac{p^2}{\omega^2} = 0 \quad (16)$$

图解法求解方程 (16), 如图 9, 可得高频分量谐波依次为 $\omega_1 = 0$ 、 $\omega_2 = 3.28\omega$ 、 $\omega_3 = 7.2\omega$ 、 $\omega_4 = 11.5\omega$ 、 $\omega_5 = 15.89\omega$ 。

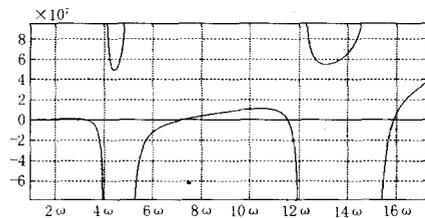


图 9 k2 点三相短路求解

Fig.9 The frequency solution for three phase short circuit occurred in k2

3 结论

通过对交流 1 000 kV 示范工程采用分布参数法理论计算, 在充电合闸及发生故障时, 故障电流含有无穷多频率的谐波, 该谐波是非整次谐波, 是由特高压的分布电容大造成的, 谐波频率向基波偏移, 这些特征是特高压与高压、超高压不同之处。理论计算表明充电合闸产生的低次谐波比故障时产生的低次谐波更低, 故障时产生的低次谐波与故障点位置有关, 故障点越远, 低次谐波越低, 越向基波靠近。在交流 1 000 kV 示范工程中继电保护应充分考虑充电合闸及故障时接近基波的谐波对继电保护的影响。

(下转第 8 页 continued on page 8)

表 2 不同采样频率下的双回线故障测距结果

Tab.2 Double-circuit line fault location on different samples

故障类型	过渡电阻 / Ω	单回线测距结果 / km		
		每周期 40 点	每周期 20 点	每周期 10 点
单相接地	0	39.240	40.321	40.834
	50	40.550	40.690	41.291
	100	40.284	40.630	41.550
两相接地	0	40.345	40.558	40.743
	50	40.589	40.770	41.310
	100	40.900	40.102	41.175
两相相间	0	39.308	39.012	38.093
	50	39.801	39.344	37.453
	100	38.941	39.015	36.756
三相短路	0	39.007	39.470	38.932

从上表可以看出:采用此种故障测距算法后,在一定的采样频率下,对于单回线和同杆并架双回线各种故障类型,无论是高阻接地还是短路都能得到比较满意的测量结果。在此仿真模型中考虑了分布电容的影响,但从仿真结果可以看出,由于线路长度较短,电容对测距结果的影响很小,几乎可以忽略。同时可见:采样频率越高,测量结果越精确。

3 影响算法精度的因素

从 EMTP 程序的仿真结果来看,算法的测距结果是令人满意的。但其测量精度仍有可能受到以下因素的影响:

1) 采样频率:由上表可以看出,采样的频率越高,测距精度越高。

2) 线路参数的准确性:如果测距算法中所用线路参数和实际线路参数不相匹配,就会产生测量误差。

3) 现场设备(CT, PT 等)影响:CT, PT 等设备会引入同步误差,使两侧的数据不再同步,影响测量精度。

(上接第 4 页 continued from page 4)

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理及技术(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
ZHU Sheng-shi. Relay Protect Principle and Technology for High Tension Networks, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [2] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
WANG Mei-yi. Applying of Power System Protection Relays[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

4 结语

本文提出了一种基于双端同步采样技术的微分方程算法,并利用相模变换减少了数据传送量。该算法不受过渡电阻、系统负荷电流等的影响,不依赖于故障类型。仿真结果表明本算法具有很好的精度。

参考文献

- [1] 何奔腾,胡为进.同杆并架双回线路模变化分析[J].电网技术,1998,22(1):25-27.
HE Ben-teng, HU Wei-jin. Mode Transformation of Double-circuit Line Tower[J]. Power System Technology, 1998,22(1):25-27.
- [2] 何奔腾,徐习东. $n \times t$ 相系统的模变化[J].电力系统及其自动化学报,1997,9(4):19-26.
HE Ben-teng, XU Xi-dong. Mode Transformation of $n \times t$ -dimensional System[J]. Proceedings of the EPSA,1997,9(4):19-26.
- [3] 腾林,刘万顺.一种实用的新型高压输电线路故障双端测距精确算法[J].电力系统自动化,2001,25(18):24-27.
TENG Lin, LIU Wan-sun. A Novel Practical Accurate Fault Location Algorithm for HV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(18):24-27.
- [4] Mladen Kezunovic, Branislava Perunicic. Synchronized Sampling Improves Fault Location.
- [5] CHEN Yun-ping, GONG Qing-wu. An Accurate Fault Location and Its Data Processing by Least Square Method[J].

收稿日期:2007-05-28;

修回日期:2007-09-05

作者简介:

杨涛(1978-),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护及自动化研究与试验工作。E-mail: power_forward@sina.com

收稿日期:2007-07-30;

修回日期:2007-09-05

作者简介:

王锐(1957-),女,高级工程师,从事继电保护研究与管理工作;E-mail:hndlw@tom.com

李瑞生(1966-),男,教授级工程师,从事继电保护方面的研究;

李文霞(1968-),女,高级工程师,长期从事电气设备研究与管理工作。