

## 串补线路模型法的改进

李一峰<sup>1</sup>, 陈平<sup>2</sup>

(1. 广东海洋大学信息学院, 广东 湛江 524088; 2. 山东科汇电气有限公司, 山东 淄博 255031)

**摘要:** 在超高压输电电路上装设串联补偿电容, 给电网运行带来了许多优点, 但却给继电保护装置的整定计算带来了一些问题。用传统方法计算线性方程组, 所得结果误差较大, 使得算法难以发挥应有的作用。文章从理论上讨论了串补线路模型法在故障暂态过程中几种可能的降阶方法, 包括线路模型代入法、误差判别法、谐波判别法、串联电容判别法和实用降阶法, 并对这些方法逐一进行误差分析。分析表明采用实用降阶法, 具有计算量小, 精度高, 且不受电容器间隙保护动作情况影响的优点。

**关键词:** 串补电容; 模型; 电力系统; 线路; 继电保护

## An improved module algorithm in series-compensated transmission lines

LI Yi-feng<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>2</sup>

(1. Information College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

(2. Kehui Electric Co, Ltd., Zibo 255031, China)

**Abstract:** The series-compensated lines are good for net running in ultra-voltage lines. But it has some limitation for relay setting coordination. The traditional method means large error for calculating linear equation groups, so its application is limited. This paper discusses a few ways to solve the problem. The ways includes module inserting, error distinguishing, wave distinguishing, series compensated and practical de-ladder means. The actual fault analysis show that the practical de-ladder means is good, the calculation work is minite, the accurate is higher, and cannot be disturbed by compensated gap relay.

**Key words:** series-compensated; module; power system; lines; relay protection

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)11-0079-03

## 0 引言

超高压输电电路上装设串联补偿电容, 可减少长距离输电线路的传输损耗, 提高系统的暂态稳定性, 抑制并行输电线路间的潮流分配, 同时, 串补电容还可以改进系统的电压水平, 串补线路的设计带来了更大的灵活性, 从各国的运行经验看, 串补技术是能够满足运行要求的, 从经济角度来看, 串补是提高长线输送容量的有效又经济的方法<sup>[1]</sup>。

串补技术虽然具有种种优点, 但也给线路保护带来了困难<sup>[2]</sup>。串联电容的接入, 破坏了线路阻抗随短路距离增加而增加的特性, 因此使常规保护失去选择性或方向性, 串补的安置地点和串补度大小的不同对线路保护的影响程度也不同, 因此对装有串补电容线路的各种保护性能均需进行深入的研究<sup>[3]</sup>。

## 1 问题的提出

利用故障后暂态分量与故障后稳态分量的迭加,

就可采用串补线路模型法求解线路阻抗<sup>[4]</sup>, 但线路模型法需要求解三阶线性方程组, 在仿真实验中, 我们发现计算结果与实际值有很大误差, 而当采用与故障情况相应的二阶线性方程组计算时, 配置同样的数字滤波器, 误差大大减少。

根据线性代数方程组求解的误差分析理论可知, 对于线性方程组:  $AX=b$

$X$  为待求向量,  $A$  为系数矩阵,  $b$  为已知向量。

其计算结果的相对误差  $\frac{\| \delta X \|}{\| X \|}$  与系数矩阵  $A$  的相对误差  $\frac{\| \delta A \|}{\| A \|}$  和右端向量  $b$  的相对误差  $\frac{\| \delta b \|}{\| b \|}$  以及方程组的条件数  $(\| A \| \cdot \| A^{-1} \|)$  的大小成正比。由于原始数据的误差和运算过程中的舍入误差是必然存在的, 因此求解对象总是有扰动的方程组, 得到的解是一个近似解。在原始数据误差一定的情况下, 解的好坏完全由条件数的大小决定。条件数较小的方程组为良态方程组, 条件数大的方程组是病态方程组。条件数总是大于 1 的, 因此求解过程必然要将原始数据的误差进行放大。一般来说, 方程组的

阶数越高, 其条件数越大, 所得结果误差越大。

可见, 为了减少计算误差, 只有两种方法: 减少原始数据的误差和降低方程组的阶数。为了减少原始数据的误差, 可采用数据窗长的滤波器, 但这将增加保护动作时间, 另外, 由于某些简化所引起的误差, 仅靠滤波是无法消除的。

## 2 降阶方法

在研究过程中, 提出了几种可能的降阶方法, 现分别进行说明其原理和性能。

### 2.1 线路模型代入法

此算法的计算方法如图 1。

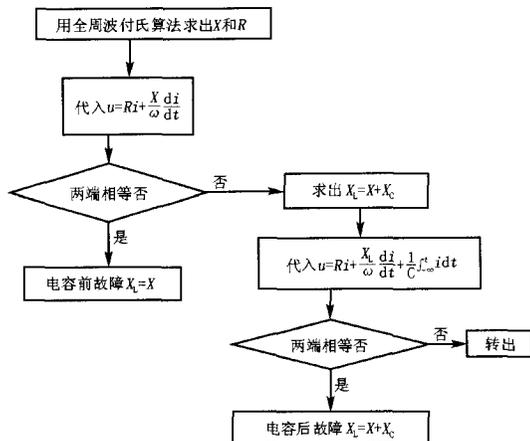


图 1 模型法流程图

Fig.1 Flows chart for modue

但是, 设电容后故障  $X = X_L - X_C$

代入  $u=Ri + \frac{X}{\omega} \frac{di}{dt}$  得:

$$u = R_i + \frac{X_L}{\omega} \frac{di}{dt} + \omega X_L \int i dt - \frac{X_C}{\omega} \frac{di}{dt} - \omega X_C \int i dt$$

当仅有工频量时,  $-\frac{X_L}{\omega} \frac{di}{dt} - \omega X_C \int i dt = 0$

因此, 在电容后短路时, 代入  $u=Ri + \frac{X}{\omega} \frac{di}{dt}$ , 等式两边也近似相等。在故障电流含有非周期分量或低频分量时,  $-\frac{X_L}{\omega} \frac{di}{dt} - \omega X_C \int i dt \neq 0$  但结果相近, 故此方法不可靠。

### 2.2 误差判别法

当电容前故障时, 由

$$\begin{cases} u_1 = R_i + L \frac{di_1}{dt} \\ u_2 = R_i + L \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

可求出 
$$L_{前} = \frac{u_{i2} - u_{i1}}{i_2 \frac{di_1}{dt} - i_1 \frac{di_2}{dt}} \quad (2)$$

当电容后故障时, 由

$$\begin{cases} u_1 - \frac{1}{C} \int i_1 dt = R_i + L \frac{di_1}{dt} \\ u_2 - \frac{1}{C} \int i_2 dt = R_i + L \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

可求出

$$L_{后} = \frac{\left(u_1 - \frac{1}{C} \int i_1 dt\right) i_2 - \left(u_2 - \frac{1}{C} \int i_2 dt\right) i_1}{i_2 \frac{di_1}{dt} - i_1 \frac{di_2}{dt}} \quad (4)$$

假设故障点在电容前, 采用式 (4) 计算, 其计算值为  $L_{计} = L_{准} - e[L]$

$$e[L] = \frac{1}{C} \frac{i_2 \int i_1 dt - i_1 \int i_2 dt}{i_2 \frac{di_1}{dt} - i_1 \frac{di_2}{dt}}$$

可见, 若故障情况与模型不符, 都将产生误差, 且误差表达式相同。因此, 只要找出误差  $e[L]$  在电容前后短路时的不同特征, 就可通过求  $e[L]$  来判断故障点相对于串补的相对位置。

仿真结果表明, 尽管不同状态下  $e[L]$  的结果不同, 但所在区间相互联接, 因此判据易受计算误差的影响, 判据不明确。

### 2.3 谐波判别法

因为电容后故障时, 电流中含有明显的低频分量, 此方法的目的是从暂态故障电流中滤出低频分量, 以低频分量的有无来判别故障点的位置。

对于高串补线路, 低频分量的频率可能在 40 Hz 以上, 因此要求滤波器有很陡的下降沿, 以避免 50 Hz 分量的干扰, 这必然要加大滤波器的时延。一般来说, 对于通带在 25~40 Hz 之间的滤波器, 至少要 25 ms 以上的数据窗。当考虑到电容器保护间隙的动作可能将电容器旁路; 而此方法则要到电容被旁路后 25 ms 以后才能准确作出电容器被旁路的判断, 因此无法满足保护要求。另外, 在串补前经过渡电阻短路时, 电流也会含有低频分量, 因此谐波判别法不适用。

### 2.4 串联电容判别法

串补线路模型法不仅可以求出  $R, L$ , 还可以求出串联电容  $1/C$ , 当电容前故障时,  $1/C=0$ , 而电容

后故障时  $1/C$  为一常数, 因此通过计算可以明确地判别出故障点相对于串补的位置, 由于差别明显, 对计算误差要求不高, 采用三阶方程组计算不会引起误判。这种算法的优点在于, 在作出故障点位置判别后, 即可采用相应的模型 (式 2、4) 来计算线路的阻抗。这时求解  $R$ 、 $L$  就可不依赖于暂态分量的存在与否, 在故障后暂态时也可求解。

在电容后故障时, 要随时监视电容器保护间隙动作情况, 因此其计算量大。

## 2.5 实用降阶法

考虑到线路电阻与线路电感之比为常数, 不随故障距离的远近而变化, 则式

$$\begin{cases} u_{t1} = Ri_{t1} + L \frac{di_{t1}}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_1} idt \\ u_{t2} = Ri_{t2} + L \frac{di_{t2}}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_2} idt \\ u_{t3} = Ri_{t3} + L \frac{di_{t3}}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_3} idt \end{cases}$$

可简化为

$$\begin{aligned} u_1 &= L \left( \frac{R}{L} i_1 + \frac{di_1}{dt} \right) + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_1} idt \\ u_2 &= L \left( \frac{R}{L} i_2 + \frac{di_2}{dt} \right) + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_2} idt \end{aligned}$$

很显然, 这种方法相对于串联电容判别法而言, 大大减小了计算量, 且精度较高, 仿真结果也证明了这种方法的优越性能。

## 3 结论

通过以上分析可知, 串补线路模型法虽然简单直观, 但在具体应用于实践中时, 却遇到了求解的

困难。本文提出了几种可能的降阶方法, 并对其逐一进行了误差分析, 采用实用降阶法, 具有计算量小, 精度高, 且不受电容器间隙保护动作情况影响的优点。

结合串联电容判别法不依赖于暂态量的特点, 当故障点在线路末端时, 可以通过判断  $1/C$  的大小, 采用相应的模型, 并配合带通滤波器, 可以提高在线路末端短路时计算的准确性。

## 参考文献

- [1] Ohura L J, et al. Digital Distance Relay with Improved Characteristics Against Distorted Transient Waveforms[J]. IEEE PWRD-4, 2001.
- [2] Sanderson M V H, et al. Protective Scheme for Series-compensated Transmission Lines[J]. IEEE PVOC, 2000, 189(7).
- [3] Thomas D, Bernd K. Neural Network Approach to Fault Classification for High Speed Protective Relaying [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 1002-1011.
- [4] 李一峰, 王琨. 一种适用于串联电容补偿线路的微机距离保护算法[J]. 电力学报, 2000, (3): 172-175.  
LI Yi-feng, WANG Kun. An Algorithm for Distance Protection Based on Micro-Processor in Series Compensated Transmissim Lines[J]. Journal of Electric Power, 2000, (3): 172-175.

收稿日期: 2006-12-05

作者简介:

李一峰(1966-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统微机继电保护技术的理论研究与应用技术; E-mail: gdzjlyf@126.com

陈平(1969-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力线路故障测距及继电保护技术。

(上接第 71 页 continued from page 71)

滤波器的控制及电网中无功的协调配合必将在未来的直流工程中得到更多的重视。

## 参考文献

- [1] 陈亦平. 直流系统无功控制对交流系统电压调整的影响分析[J]. 南方电网技术研究, 2005.
- [2] 赵毓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
ZHAO Wan-jun. Engineering Application of HVDC Transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] PTDH171/P-000088/ED1.020.AZ- a Study Reports Reactive Power Management[Z].

- [4] PTDH171/P-000088/ED4.321.AZ- 0 C / P Design Specifications DC Station Control[Z].

收稿日期: 2006-07-10; 修回日期: 2007-02-11

作者简介:

宋述波(1978-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事高压直流输电系统的运行维护工作; E-mail: songshubo@126.com

袁鹏(1979-), 男, 工程师, 学士, 从事高压直流输电系统管理工作;

吴宏波(1978-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事高压直流输电系统的运行维护工作。