文章编号:1005-0523(2000)02-0028-03

串联补偿电路的级数分析法

何人望, 邱万英, 熊翔葆

(华东交通大学 电信工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:以电力系统中常见的串联补偿电路为研究对象,提出了一种新的分析方法——级数分析法19.该方法用多项式来描述系统中铁磁元件的磁饱和特性,经过一系列数学推导,得到了可直接计算短路电流的解析式19.

关 键 词:串联补偿;磁饱和;短路电流;麦克劳林级数

中图分类号:TM744 **文献标识码:**A

0 引 言

为了电力系统的稳定运行,电力系统中常常接有串联补偿电容器,分析接有串联补偿电容器的电力系统短路电流,对于继电保护装置的选用和整定以及系统可靠性分析等等,具有重要意义19.串联补偿电路和等值电路可最终简化为图1形式19.

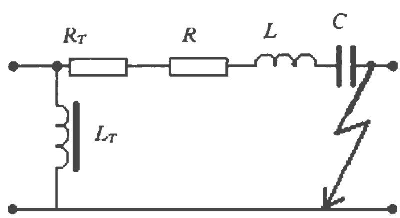

图1 串联补偿电路的等值电路

假设各参数都是线性的,则有

$$\left.\begin{array}{l}\dfrac{d^2 i_g}{d\tau^2}+\dfrac{R+R_T}{X+X_T}\dfrac{di_g}{d\tau}+\dfrac{X_c i_g}{X+X_T}=\dfrac{1}{X+X_T}\dfrac{du}{d\tau}\\ \qquad\qquad\qquad\qquad\tau=\omega t\end{array}\right\}\qquad(1)$$

式中:R,X,X_C分别为线路电阻、感抗、容抗;R_T,X_T分别为变压器电阻、电抗19.

式(1)表明,估算短路电流的复杂问题可简化为求解二或三阶常系数线性非齐次常微分方程的问题19.方程的通解和特解看似容易求得,并且可用谐波分量的形式表示19.然而,由于短路电流会使铁芯极易饱和,一般无法求出方程的解析表达式19.在计算机技术高度发展的今天,有必要建立一种适用于计算机的分析方法19.

1 级数分析法

收稿日期:1999-08-27;**修订日期:**1999-10-18

作者简介:何人望(1964-),男,江西信丰人,华东交通大学讲师,工学硕士19.

由于磁路饱和等因素，带有铁芯的线圈中磁通与电流呈非线性关系，用多项式表达为

$$\varphi = \sum_{k=0}^{n} \alpha_k i^{2k+1} \tag{2}$$

由法拉第电磁感应定律，可得

$$u = N\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} = N\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}i}\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = N\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}S_0;\quad S_0 = \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}i} = \sum_{k=0}^{n}(2k+1)\alpha_k i^{2k} \tag{3}$$

式中：N 为线圈匝数。如此以来，式(1)可改写为

$$\left.\begin{aligned} u &= u_R + u_L + u_C + u_n \\ u_R &= (R + R_r) i_g \\ \frac{\mathrm{d}i_g}{\mathrm{d}\tau} &= \frac{1}{X}u_L \\ \frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}\tau} &= \frac{1}{\omega C}i_g \\ u_n &= \omega_1 N\frac{di_g}{d\tau}S_0 \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

一般说来，此类微分方程组不存在精确的解析解。这里，笔者试图求出短路电流的数值解。为此，将短路电流写作麦克劳林级数的形式。

方程(4)2边同时对 τ 求 m 或 $m-1$ 阶导数，得

$$\left.\begin{aligned} i_g^{(m)} &= (1/x)u_L^{(m-1)} \\ u_c^{(m-1)} &= (1/\omega C)i_g(m-2) \\ u_R^{(m-1)} &= (R + R_r)i_g^{(m-1)} \\ u_n^{m-1} &= \omega_1 N(i_g S_0)^{(m-1)} = \omega_1 N\sum_{\lambda=0}^{m-1}C_{m-1}^{\lambda}i_g^{(m-\lambda-1)}S_0^{(\lambda)} \\ u_L^{(m-1)} &= u^{m-1} - u_c^{m-1} - u_c^{(m-1)} - u_n^{(m-1)} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

将式(3)代入式(5)并整理得

$$i_g^{(m)} = \frac{1}{X}\left(u^{(m-1)} - (R + R_T)i_g^{(m-1)} - \frac{1}{\omega C}i_g^{(m-2)} - \omega_1 N\sum_{\lambda=0}^{m-1}C_{m-1}^{\lambda}i_g^{m-\lambda-1}S_0^{(\lambda)}\right) \tag{6}$$

假设短路电流初值 $i_g(0) = I_{g0}$，电源电压为 $u = U_m\cos\omega t = U_m\cos\tau$，并注意到

$$(\cos\tau)^{(p)}\big|_{\tau=0} = \Delta_{(p)} = \begin{cases} 0 & (p = 2\lambda + 1) \\ 1 & (p = 4\lambda) \\ -1 & (p = 4\lambda + 2) \end{cases}\qquad (\lambda = 0, 1, 2, \cdots)$$

可得

$$u^{(m-1)}\big|_{\tau=0} = \Delta_{(m-1)}U_m \tag{7}$$

此处定义 S_ς 为

$$S_\varsigma = (S_{\varsigma-1})_{i_g}^{(1)}\qquad (\varsigma = 1, 2, \cdots, \lambda) \tag{8}$$

由式(3)知 $S_0 = \dfrac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}i} = \sum_{k=0}^{n}(2k+1)\alpha_k i_g^{2k}$

则 S_0 的各阶导数可写作

$$(S_0)_\tau^{(1)}=(S_0)_{i_g}^{(1)}(i_g)_\tau^{(1)}=S_1 i_g)_\tau^{(1)}$$

$$(S_0)_\tau^{(2)}=(S_1(i_g)_\tau^{(1)})^{(1)}$$

$$(S_0)_\tau^{(k_0)}=(S_1(i_g)_\tau^{(1)})^{(k_0-1)}=\sum_{k_1=0}^{k_0-1}C_{k_0-1}^{k_1}(i_g)^{(k_0-k_1)}S_1^{(k_i)}$$

$$(S_1)_\tau^{(k_1)}=\sum_{k_1=0}^{k_1-1}C_{k_1-1}^{k_2}(i_g)^{(k_1-k_2)}S_2^{(k_2)}$$

$$\cdots$$

$$(S_\lambda)_\tau^{(k_\lambda}=\sum_{k_{\lambda+1}=0}^{K_\lambda-1}C_{k_\lambda-1}^{k_{\lambda+1}}(i_g)^{(k_\lambda-k_{\lambda+1})}S_{\lambda+1}^{(k_{\lambda+2})})=(i_g)_\tau^{(1)}S_{\lambda+1}$$

从而求得

$$(S_0)_\tau^{(\lambda}=(\lambda-1)!\prod_{\xi=1}^{\lambda}\sum_{k_\xi=0}^{k_{\xi-1}-1}\sum_{k=1}^{n}\prod_{\gamma=1}^{\lambda}\frac{(2K+1)!(i_g)_\tau^{(k_{\xi-1}-k_\xi)}}{k_\gamma(k_{\gamma-1}-k_\gamma-1)!(2k-\lambda-1)!\alpha_k i_g^{k-\lambda-1}} \tag{9}$$

格式(9)代入式(6)可得

$$i_g^{(m)}=\frac{1}{X}\Bigg(u^{(m-1)}-(R+R_r)i_g^{(m-2)}-$$

$$\left(\omega N_1(\lambda-1)!\sum_{\lambda=0}^{m-1}\prod_{k_\xi=1}^{\lambda}\sum_{k_\xi=0}^{k_{\xi-1}-1}\sum_{k=1}^{n}\prod_{\gamma=1}^{\lambda}\frac{(2K+1)!(i_g)_\tau^{(k_{\xi-1}-k_\xi)}}{k_\gamma(k_{\gamma-1}-k_\gamma-1)!(2k-\lambda-1)!\alpha_k i_g^{k-\lambda-1}}\right)\Bigg) \tag{10}$$

已知电压、电流初值及电器参数时,由式(11)可求出短路电流19.对于含有铁磁元件的串联补偿电路,分析其短路电流比较困难19.本级数分析法可用来解决这一难题19.

[参 考 文 献]

[1] 复承铨. 非线性电路[M]. 北京:人民邮电出版社,1986.

[2] 顾光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:水利电力出版社.1985.

Series Analysis of Abscissa Compensation Circuit

HE Ren-Wang, QIU Wan-yin, XIONG Xiang-bao

(School of Electrical and Information Eng., East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper presents a method to calculate the short-circuit current of an abscissa compensation circuit. The case of magnetic saturation is considered.

Key words: abscissa compensation; short-circuit current; magnetic saturation; Maclaurin series