

文章编号: 1001-1609(2007)03-0186-03

## 基于 FEM 的同相并联大截面三相电缆电流分布的研究

梁永春<sup>1,2</sup>, 柴进爱<sup>1</sup>, 李延沐<sup>3</sup>, 李彦明<sup>1</sup>, 王正刚<sup>4</sup>, 李忠魁<sup>4</sup>( 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 河北科技大学, 河北 石家庄 050054;  
3. 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 4. 郑州市电业局, 河南 郑州 450006)

Study on Current Distribution in Same Phase of Two Parallel Large Section Cables Based on FEM

LIANG Yong-chun<sup>1,2</sup>, CHAI Jin-ai<sup>1</sup>, LI Yan-mu<sup>3</sup>, LI Yan-ming<sup>1</sup>, WANG Zheng-gang<sup>4</sup>, LI Zhong-kui<sup>4</sup>

( School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, China; 3. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. Zhengzhou Electric Power Company, Zhengzhou 450006, China)

摘要: 利用有限元法计算了单芯大截面电缆用于同相两根并联电缆运行时的载流量分配和不平衡系数。并利用电磁场理论和 ANSOFT, 计算了 6 种同相两根并联电缆排列方式下的载流量分配和不平衡系数的比较, 给出了 3 种能够减小载流量分配不均和降低不平衡系数的同相两根大截面电缆线路并联运行的优化排列方式。

关键词: 有限元; 同相两根并联电缆; 载流量; 不平衡系数; 邻近效应; ANSOFT

中图分类号: TM247.4 文献标志码: A

Abstract: Ampacity distribution and imbalance coefficient of two parallel cables was calculated based on finite element method. Ampacity distribution and imbalance coefficient of six laying mode of two parallel cables was calculated and compared based on electro-magnetic theory and ANSYS, and three optimization laying modes of two parallel cables were presented to decrease the imbalance coefficient obviously.

Key words: finite element method (FEM); two parallel cables in the same phase; ampacity; imbalance coefficient; proximity effect; ANSOFT

## 0 引言

随着电力负荷密度的增大, 地下或半地下式变电所逐渐出现并被大量使用。同相两根并联大截面单芯电缆开始用作变压器与开关柜之间的联络, 它可提高整体电缆回路的输送能力, 减少变电所的建筑规模, 优化所内变电设备的布置, 充分提高变电所的灵活性。但仍存在以下问题: 一方面, 由于电缆间邻近效应的影响, 同相两根并联电缆的导体交流电阻不能完全匹配; 另一方面, 每一根电缆的电感受到同相另一根电缆和其他相电缆的影响, 排列方式不

当将造成同相两根电缆的电感产生比较大的差值。同时, 同相两根电缆的交流电阻和电感不同, 总的阻抗也将不相等。在电压相等的情况下, 两根电缆电流的分配主要决定于各自的阻抗。因此, 同相两个回路排列方式不当时, 电缆的载流量不能平均分配, 将产生不平衡现象, 这就大大降低了整体电缆回路的输送容量, 成为变电所内电气设备的传输瓶颈<sup>[1]</sup>。

笔者利用有限元的方法对电缆的邻近效应和电感进行了计算和分析, 并给出了电缆间电流的分配和不平衡系数。

## 1 电缆的电磁场数学模型

用于变电所的同相两根大截面电缆并联运行可以看作工频似稳电磁场, 因此模型可以做如下简化: 由于电缆长度与直径相比为无限大, 可将整个场看作二维电磁场; 忽略位移电流的影响; 导体的电导率为常数; 忽略铁磁物质的磁滞效应<sup>[2]</sup>。

## 1.1 电磁场基本方程

工频似稳电磁场可以采用 A ~ 法进行求解<sup>[3]</sup>。复数形式的麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$$

媒质方程为

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

式(1)中  $\mathbf{J}_s$  为源电流密度, 可由给定同相电缆的总电流除以同相电缆截面求得;  $\mathbf{J}_e$  为涡电流密度。

收稿日期: 2007-02-07; 修回日期: 2007-05-15

作者简介: 梁永春(1971-), 男, 博士研究生, 主要从事电力设备的电磁和热的计算。

引入矢量磁位  $A$ , 定义为

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 则有

$$\nabla \times (E + j \omega A) = 0$$

引入标量电位  $\phi$ , 则有

$$E = -(\nabla \phi + j \omega A)$$

因此, 涡电流密度为

$$J_e = \sigma E = -\sigma (\nabla \phi + j \omega A)$$

综合以上各式, 有

$$\nabla \times (\nabla \times A) = J_s - \sigma (\nabla \phi + j \omega A) \quad (4)$$

对于涡电流密度  $J_e$ , 有

$$\nabla \cdot J_e = 0$$

则

$$\nabla \cdot (\nabla \phi + j \omega A) = 0 \quad (5)$$

将式(4)、(5)联立, 可求解方程中各变量的值。

### 1.2 边值问题

不同媒质分界面磁场强度法向梯度相等。

$$B_{1n} = B_{2n}$$

$$H_{1t} = H_{2t}$$

不同媒质交接面电磁连续条件为

$$A_i = A_j$$

$$\frac{1}{\mu} \cdot \nabla A_i = \frac{1}{\mu} \cdot \nabla A_j$$

式中:  $i$  和  $j$  代表场域的相邻两层介质。

### 1.3 不同介质区域的方程

有源导体即加有电流源, 存在趋肤效应和邻近效应, 其矢量磁位方程与式(4)相同。

无源导体没有电流源, 只存在由电磁场引起的涡流, 其矢量磁位方程为

$$\nabla \times (\nabla \times A) = -\sigma (\nabla \phi + j \omega A)$$

其他介质区域为

$$\nabla \times (\nabla \times A) = 0$$

### 1.4 导体电流计算

在求得动态矢量磁位后, 电缆导体中的电流密度可以由  $J = \sigma E$  计算, 整个导体的电流可以由导体截面内对电流密度的积分求得。

## 2 电缆的有限元模型

### 2.1 电缆结构

空气中的电缆结构场域模型见图1。其有限元模型分为6部分: 电缆导体区域、电缆绝缘层区域、电缆金属套区域、电缆外护层区域、空气区域、边界。采用 ANSOFT 为计算工具, 同时假设三相电流相等。给同相两根电缆施加一个总的电流, 同时将两根

球边界<sup>[4]</sup>。

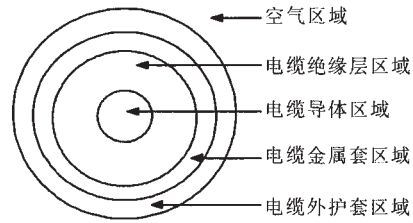


图1 单根单心电缆有限元模型

### 2.2 电缆不同结构电磁场方程

电缆导体区域  $\nabla^2 A_1 = -\mu_0 J_s - \mu_0 J_e$  其中  $J_s$  为电缆所加电流源;  $J_e$  为导体涡流。电缆绝缘层区域  $\nabla^2 A_2 = 0$ 。电缆金属套区域:  $\nabla^2 A_3 = -\mu_0 J_e$ , 其中  $J_e$  为金属套区域涡流。电缆外护层区域  $\nabla^2 A_4 = 0$ 。空气区域:  $\nabla^2 A_5 = 0$ 。

## 3 计算

针对变电所内可能出现的几种同相两根并联的形式, 计算了电流在同相两根电缆中的分配及其不平衡系数。假设并联电缆为  $800 \text{ mm}^2$  的  $10 \text{ kV}$  交联聚乙烯电力电缆, 电缆间距为  $100 \text{ mm}$ , 忽略相间电流的不平衡, 三相总电流均取  $1000 \text{ A}$ 。图2为6种电缆排列图。其中方案1~3为正常排列的3种方案, 方案4~6为调整后的3种方案。表1给出了6种排列方案下不同电缆的载流量分配。表中  $I_{A1}$ 、 $I_{A2}$ 、 $I_{B1}$ 、 $I_{B2}$ 、 $I_{C1}$ 、 $I_{C2}$  分别代表 A、B、C 相中两根并联电缆的载流量。

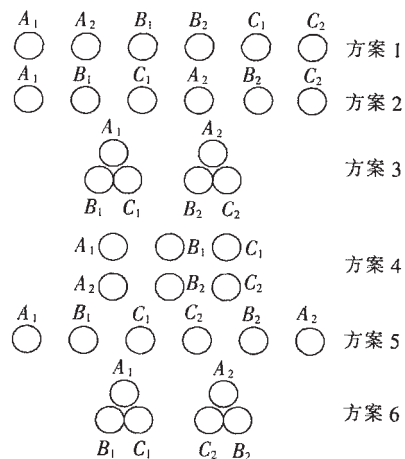


图2 电缆排列图

同相两根电缆间电缆载流量的分配比例可以用不平衡系数表征, 其计算公式为

$$K_A = I_{A1} / I_{A2}; K_B = I_{B1} / I_{B2}; K_C = I_{C1} / I_{C2}$$

表2给出了6种排列方案下同相两根电缆的不平衡系数。表2中  $k_A$ 、 $k_B$ 、 $k_C$  分别代表 A、B、C 相两根并联电缆载流量的不平衡系数。

由表1、2可知, 方案4~6与方案1~3相比, 不平衡系数大大降低, 同相两根电缆间的载流量基本

表 1 不同敷设方式下电缆的载流量 A

方案	I <sub>A1</sub>	I <sub>A2</sub>	I <sub>B1</sub>	I <sub>B2</sub>	I <sub>C1</sub>	I <sub>C2</sub>
1	514.0	486.0	555.8	444.2	573.3	426.7
2	466.4	533.6	504.7	495.3	553.6	446.4
3	487.3	512.7	543.8	456.2	533.4	466.6
4	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
5	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
6	500.4	499.6	497.6	502.4	501.7	498.3

表 2 不同敷设方式下的不平衡系数

方案	k <sub>A</sub>	k <sub>B</sub>	k <sub>C</sub>
1	1.057 6	1.251 2	1.343 7
2	0.874 1	1.019 0	1.240 6
3	0.950 5	1.192 0	1.143 7
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1.001 6	0.990 4	1.006 8

平均分配。

同相并联的两根电缆两端电压相同，其电流分布由两根电缆的阻抗决定。在电缆电阻和自感抗基本相同时，其电流分布由邻近电缆的感应电势决定。

对于方案 1、2、4、5，假设相邻两根电缆间距为 S，两回路电流平衡，且三相电流平衡。三相电流为

$$\begin{cases} I_A = I \\ I_B = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) I \\ I_C = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) I \end{cases}$$

则，方案 1 中 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 电缆中的感应电势不相等，分别为

$$\begin{aligned} E_{C_1} &= -2 \times 10^4 \left[ I_A \ln \frac{1}{12S \times S} + I_B \ln \frac{1}{2S \times S} + I_C \ln \frac{1}{S} \right] \\ E_{C_2} &= -2 \times 10^4 \left[ I_A \ln \frac{1}{20S \times S} + I_B \ln \frac{1}{6S \times S} + I_C \ln \frac{1}{S} \right] \end{aligned}$$

方案 4 中 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 电缆中的感应电势相等，其值为

$$E_C = 2 \times 10^4 \left[ I_A \ln \frac{1}{2\sqrt{5} S \times S} + I_B \ln \frac{1}{\sqrt{2} S \times S} + I_C \ln \frac{1}{S} \right]$$

方案 2 中 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 电缆中的感应电势不相等，分别为

$$E_{C_1} = -2 \times 10^4 \left[ I_A \ln \frac{1}{2S \times S} + I_B \ln \frac{1}{2S \times S} + I_C \ln \frac{1}{3S} \right]$$

$$E_{C_2} = -2 \times 10^4 \left[ I_A \ln \frac{1}{10S \times S} + I_B \ln \frac{1}{4S \times S} + I_C \ln \frac{1}{3S} \right]$$

方案 5 中 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 电缆中的感应电势相等，其值为  $E_C = -2 \times 10^4 \left[ I_A \ln \frac{1}{6S \times S} + I_B \ln \frac{1}{2S \times S} + I_C \ln \frac{1}{S} \right]$ 。

方案 3 和方案 6 也可得出相同的结论。多回路电缆并联使用时，当同相的电缆在物理位置和相位上呈对称分布时，同相两根电缆的交流电阻和电感将趋于相等，因此，其载流量分配更加均衡。

### 4 结语

通过对 6 种排列方式进行比较，较优的 4~6 3 种方案中两个回路同相电缆的载流量分配更加均衡。在电缆实际运行时，可以根据实际情况，选取 4~6 中的一种敷设方式。

### 参考文献:

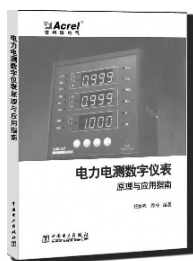
- [1] 李季, 罗隆福, 许加柱. 电力机车主变压器油箱损耗的三维有限元分析[J]. 高压电器, 2005, 41(3): 186-187.
- [2] 武安波, 王建华, 耿英三. 密集型母线槽磁场-温度场综合有限元分析[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 7-9.
- [3] 盛剑甬. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [4] 刘国强. Ansoft 工程电磁场有限元分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

## 《电力电测数字仪表原理与应用指南》

### 新书介绍

《电力电测数字仪表原理与应用指南》由湖南大学任致程老师编著，以上海安科瑞电气有限公司产品为素材，介绍了电力电测数字仪表常用显示器件、专用芯片、电路原理、软件设计方案、产品用途、操作技能、选型方法、技术要求、试验方法、检验规则、应用方案等。本书可供从事科研、设计、生产、测试、维修工作的各类电气工作者阅读，也可作为各高等院校电气信息工程、测控技术、仪器仪表等专业的教学图书。

本书由中国电力出版社出版发行，刊号 ISBN 978-7-5083-5078-3。全书共分 8 章，16 开本，354 页。定价：40.00 元/册。



订购办法：中国电力出版社 电工电子图书中心

地址：北京三里河路 6 号 邮编：100044

电话：010-63416220

http://www.cepp.com.cn

上海安科瑞电气有限公司(代邮, 免邮费, 请注明册数)

地址：上海市嘉定区棕坊桥洪德路 99 号 邮编：201801

电话：021-59104851

传真：021-59104852

联系人：吕亚萍

http://www.acrel.cn