

基于电磁-热耦合模型的直埋电缆载流量计算及间距的影响研究

准确地计算电缆载流量,对电缆的安全、稳定运行具有重要意义。然而,当电缆间距离较短时,电缆群间的电磁效应增强,IEC 60287不能给出电缆损耗准确的计算公式,从而使得电缆载流量存在一定的误差。为了准确地计算短间距敷设条件下电缆群的载流量,提出了电缆的电磁-热耦合模型。该模型以110 kV交联聚乙烯电缆为例,利用多物理场耦合分析软件Comsol Multiphysics对不同间距电缆的电磁场和温度场进行了同步耦合计算,并与IEC 60287标准的计算结果比较分析。计算实例表明:基于电磁-热耦合模型的载流量计算结果比IEC 60287准确度更高;当电缆间距较长时,IEC 60287和电磁-热耦合模型计算电缆载流量误差较小;当电缆间距较短时,两种算法计算电缆载流量误差相对比较大。

杨上兴/华南理工大学广州学院



杨上兴/助教

关键词/Keywords

电力电缆 ·
载流量 ·
短间距 ·
电磁-热耦合 ·

随着城市建设和电力工业的不断发展,地下电力电缆在输配电线路中得到越来越广泛的应用^[1-2]。载流量是电力电缆的一项重要参数,它是指绝缘层承受的长期工作温度不超过绝缘材料耐受温度极限所对应的最大工作电流。当负荷电流长期大于载流量时,将会加速绝缘材料老化,缩短电缆使用寿命;反之,电缆截面积得不到充分利用,造成资源浪费^[3-4]。因此,准确计算其载流量对保证电缆线路的安全可靠运行并提高线路运行的经济性具有重要的意义。

目前工程上电缆载流量计算大部分基于IEC 60287热路模型^[5],该模型对于比较简单情况可以在满足准确度的基础上加快计算速度。然而,当施工人员因不清楚电缆去向和电压等级导致电缆敷设间距较短时,由于IEC 60287仅给出

在一定限制条件下单回路电缆邻近效应简单计算公式,使得其不能准确地计算短间距电缆群损耗,进而使得电缆载流量存在一定的误差^[6]。

为了准确计算短间距敷设条件下电缆群载流量,本文提出了电缆的电磁-热耦合模型,并以110 kV电缆为例,应用多物理场耦合分析软件Comsol Multiphysics对不同间距下电缆载流量进行了计算,并与IEC 60287标准的结果进行比较。

电缆的电磁-热耦合模型

1. 电磁场模型

为了简化电缆电磁场模型,作如下假设^[7]:

- 1) 电缆的工频电磁场可以看作似稳场处理,忽略位移电流的影响。
- 2) 假设电缆无限长,不考虑自身的扭曲,将问题简化为二维问题。
- 3) 忽略铁磁物质的磁滞效应并设为各向同性的媒质。
- 4) 导体的电导率 σ 是一个随温度变化的量,可表示为

$$\sigma = \frac{1}{\rho_{20}[1 + \alpha_{20}(T - 20)]} \quad (1)$$

式中, ρ_{20} 为20℃导体电阻率, $\Omega \cdot m$; α_{20} 为导体的电阻温度系数,1/K。

基于上述假设,电缆的各层损耗计算可以由下述公式计算得到^[8]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_s + j\omega\sigma A \quad (2)$$

式中, A 为 z 轴方向的磁矢位, Wb/m ; J_s

为源电流密度, A/m^2 ; μ 为磁导率, H/m ; σ 为电导率, S/m 。

求得磁矢位 A 后, 电缆各截面内各处电流密度可以描述为

$$J = -j\omega\sigma A + J_s \quad (3)$$

电缆的各层损耗为

$$q_v = \frac{1}{\sigma} \int J^2 dS \quad (4)$$

2. 温度场模型

不考虑电缆自身的扭曲, 电缆的温度场计算通常被简化为二维稳态导热问题, 其物理模型可由具有一定边界条件的固体导热偏微分方程^[6]表示。

(1) 固体导热偏微分方程

图1为单芯电力电缆结构图。对于具有内热源的区域, 固体导热偏微分方程^[7]为

$$\frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} + q_v = 0 \quad (5)$$

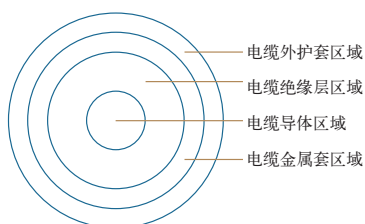


图1 单芯电力电缆结构图

对于无内热源区域（如电缆其他层、土壤等）则为

$$\frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

式中, (x,y) 为二维平面坐标; $T(x,y)$ 为温度, $^{\circ}C$; q_v 为单位面积上产生的热量, W/m , 其数值由式(4)计算而得。

(2) 边界条件

任何传热问题的边界条件均可归结为三类边界条件: 第一类边界条件为已知边界温度; 第二类边界条件为已知边界法向热流密度; 第三类边界条件为对流边界条件, 即已知对流换热系数和流体温度。三类边界的控制方程^[8]如下

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} = 0 \\ T(x,y)|_{\Gamma} = f(x,y)|_{\Gamma} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} = 0 \\ T(x,y)|_{\Gamma} + q_2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial y^2} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha(T - T_f)|_{\Gamma} \end{cases} \quad (9)$$

式中, Γ 为电缆表面的边界; λ 为土壤导热系数, $W/(m \cdot K)$; α 为表层土壤和空气的换热系数, 换热系数可由下式得出

$$\alpha = N_u \frac{\lambda}{l} \quad (10)$$

$$N_u = c(G_r P_r)^n \quad (11)$$

$$G_r P_r = \frac{\beta g \Delta t l^3}{\nu^2} - \frac{\nu}{a} \quad (12)$$

式中, G_r 为格拉晓夫数; P_r 为普朗特数; β 为体积膨胀系数; Δt 为温差, $^{\circ}C$; l 为线性尺寸, m ; ν 为运动粘度; N_u 为努赛尔数; c 和 n 为系数。

本文以110 kV土壤直埋电力电缆为例, 即电缆本体和周围土壤只存在固体传热, 其温度场分别由式(5)和式(6)计算得到, 而式(5)电缆中的热源由电磁场方程式(4)计算得到, 边界条件由式(7)~式(12)确定。

实例分析

1. 单根电缆载流量计算结果分析与算法验证

为了说明多场耦合法的正确性与准确性, 以630 mm² YJLW 03 XLPE单根电缆(见图1)为例, 在电缆芯通800 A电流、电缆表皮温度为42.6 $^{\circ}C$ 条件下, 计算单根电缆温度场分布, 并与IEC 60287标准、试验数据对比。

表1为在800 A电流下耦合法、实验法以及IEC 60287标准计算结果, 由表1可知电磁-热耦合模型计算缆芯温度与实验法、IEC 60287分别相差0.60%、2.38%。误差的原因主要由于缆芯损耗不

同, IEC 60287是在给定电缆缆芯最高工作温度90℃下计算各种损耗, 这些都会使得由IEC 60287计算结果不够准确。而电磁-热耦合的缆芯损耗是根据电磁场和热场耦合直接计算得出, 考虑了参数随温度变化, 使得其计算结果更接近实际值。

表1 缆芯电流800 A缆芯温度对比表

计算方法	耦合法	试验法 ^[14]	IEC 60287
缆芯温度/℃	61.73	62.1	63.2

2. 三相单回路直埋电缆载流量计算及间距影响分析研究

单回路电力电缆示意图如图2所示。以64/110 kV 630 mm² YJLW03 XLPE电力电缆为例(见图2), 利用电磁-热耦合模型对其载流量进行计算。敷设条件: 电缆间距200 mm, 埋深1 000 mm, 下边界、左右边界取距离电缆20 m的直线, 空气温度25℃, 土壤深层温度8℃。电缆结构参数如表2所示, 其他材料物性参数参考IEC 60287标准。

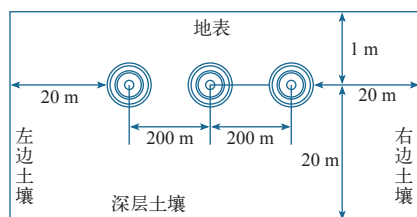


图2 单回路电力电缆示意图

表2 电缆结构参数

结构名称	半径/mm
导体	15.1
绝缘层	34
半导电无纺布带	37.5
金属套	45.5
外护套	51

3. 模型设置

假设三相电流的平衡, 给每根电缆导体施加幅值相同、相角相差120°的电流, 同时在z轴方向上耦合电压。采用金属护套为单端接地, 无环流存在。整个区域采用不均匀网格。

4. 结果分析

(1) 单回路电缆载流量计算结果分析

当达到绝缘耐受温度极限90℃时, 电磁-热

耦合模型计算电缆群温度分布如图3所示。温度从左到右温度为: 86℃、90℃和86℃; 导体最高工作温度出现在电缆的中间相, 最低温度出现在左侧即电流超前相。产生上述现象的主要原因: 电缆中间相受电磁感应的影响邻近效应比两侧相要大, 导致中间相导体损耗最大, 从而电缆中间相温度最高; 由于电缆电流相位的影响, 左侧电缆金属屏蔽层涡流损耗最小。

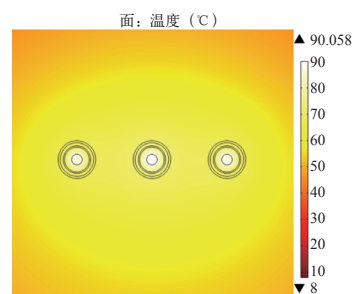


图3 单回路电缆群温度分布图

电磁-热耦合模型计算求得电缆载流量为917.82 A, 由IEC 60287标准计算所得的载流量为912.37 A, 若以IEC 60287标准计算结果为标准, 本文方法计算求得载流量误差为0.59%。

(2) 不同间距对电缆载流量的影响

图4为电磁-热耦合模型和IEC 60287计算电缆载流量与电缆间距的关系的对比图。以IEC 60287标准为参考, 两种方法的相对误差如图5所示。

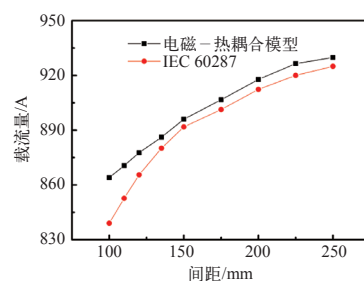


图4 间距变化时电缆载流量对比图

由图4可得出以下结论:

1) 电缆间距对电缆群载流量有较大的影响, 间距250 mm电缆群载流量比100 mm载流量提高了8%左右。其原因是随着间距的增加, 电缆间的电磁效应和热效应均减弱, 造成载流量增加。

2) 电磁-热耦合模型计算载流量总大于IEC 60287的计算的结果, 这是由于IEC算法是基于

Kennelly假设的基础上,将实际模型简化为一维,然后根据经验公式进行计算,计算结果比较保守。

3) 本文算法与IEC算法计算电缆载流量的相对误差随电缆间距下降(特别150 mm以下)而显著增大。当间距为100 mm时,两种方法计算载流量误差高达3%(见图5)。

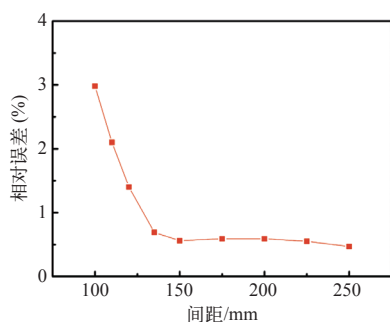
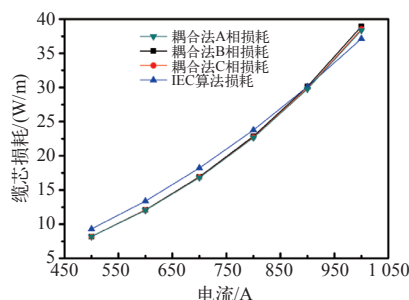
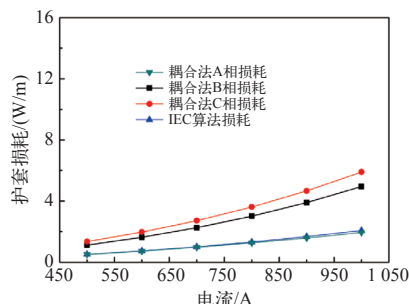


图5 两种方法载流量相对误差

载流量误差主要是由两种方法计算得到的电缆导体焦耳损耗和金属套涡流损耗不同引起的。由图6和图7可知:在电缆间距为250 mm时,两种方法计算电缆缆芯损耗和金属套损耗相差不大,故两种方法的载流量计算误差比较小;电缆间距为100 mm时,由于IEC标准只给出了大间距下单回路电缆损耗计算公式,因小间距下电缆群间电磁效

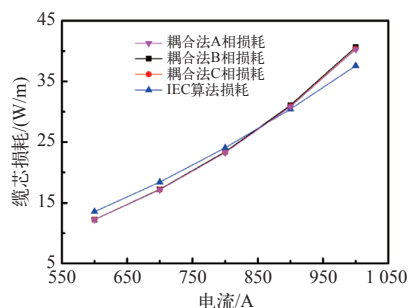


(a) 间距250 mm时两种方法缆芯损耗对比图

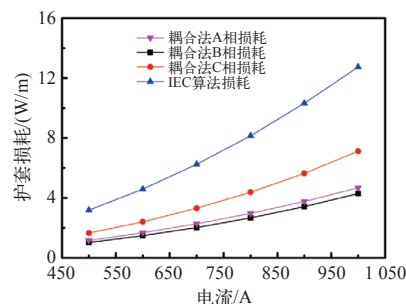


(b) 间距250 mm时两种方法金属套损耗对比图

图6 间距250 mm时电缆损耗对比图



(a) 间距100 mm时两种方法缆芯损耗对比图



(b) 间距100 mm时两种方法金属套损耗对比图

图7 间距100 mm时电缆损耗对比图

应增强,从而导致电缆载流量计算误差比较大。对于本文算例,当间距大于150 mm时,两种方法都适用;当间距小于150 mm时,推荐使用电磁-热耦合模型计算电缆群载流量。

结束语

本文以110 kV电缆为例,利用电缆的电磁-热耦合模型对不同间距电缆载流量进行计算,并与IEC 60287计算结果进行比较,结果表明:基于电磁-热耦合模型的载流量计算结果比IEC 60287准确度更高;当电缆间距较短时,由于电缆群间电磁效应增强,IEC 60287经验公式计算电缆损耗存在一定的误差,使得其计算电缆载流量不够准确;本文算例电缆载流量最大误差为3%,基本满足工程实际要求。然而,对于复杂条件下多回路电缆群,特别是短间距情况下,电缆间电磁相互作用更加强烈,不能简单按IEC 60287标准给定方法计算,但可以用电磁-热耦合模型对这种复杂条件下多回路电缆载流量进行评估校验,确保电缆在安全的范围内工作,对电缆敷设和运行具有指导意义和良好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 梁永春, 柴进爱, 李彦明, 等. 有限元法计算交联电缆涡流损耗 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (9): 196-199.
- [2] 梁永春, 李延沐, 李彦明, 等. 利用模拟热荷法计算地下电缆稳态温度场 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (16): 129-134.
- [3] 郑雁翎, 王宁, 李洪杰, 等. 电力电缆载流量计算的研究与发展 [J]. 电线电缆, 2010 (2): 4-9.
- [4] 孟庆民. 地下电缆温度场的场路结合算法 [J]. 电网技术, 2009 (20): 193-196.
- [5] 雷鸣, 刘刚, 邱景生, 等. 单芯电缆线芯温度的非线性有限元法实时计算 [J]. 电网技术, 2011 (11): 163-168.
- [6] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (8): 185-190.
- [7] 王巧玲, 杨玉平, 梁永春. 基于热电耦合的10 kV XLPE地下电缆群温度场数值计算 [J]. 电工电能新技术, 2012 (2): 27-30.
- [8] 付永长, 张文斌, 陈涛, 等. 不规则排列电缆温度场及载流量计算 [J]. 电网技术, 2010 (4): 173-176.

(收稿日期: 2015-04-28) EA

(上接第28页)

结束语

本文在综合平衡粒子的局部搜索和全局搜索、动态改变惯性权重、提高粒子的收敛速度以及保留粒子优良信息等方面, 对基本PSO算法进行了改进, 提出了多策略融合自适应粒子群优化算法。并用MSI-APSO算法求解了以有功网损最小、电压偏差最小及电压稳定裕度最大为目标的无功优化数学模型。对IEEE 14和IEEE 30节点系统算例进行仿真, 仿真结果验证了本文所提算法的有效性, 同时也证明了该算法在收敛速度和优化效果上具有比其他几种改进PSO算法更佳的性能。

参考文献

- [1] 姚煜, 蔡燕春. 离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (3): 48-52.
- [2] 刘春霞, 刘立群. 免疫小脑模型神经网络优化光伏输出 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (11): 145-148.
- [3] 杨旭, 曾成碧, 陈宾. 基于广义动态模糊神经网络的光伏电池 MPPT 控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (13): 22-25.
- [4] 龙洁. 基于 NN 模型估计的光伏最大功率点跟踪控制技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (20): 38-42.
- [5] 傅诚, 陈鸣, 沈玉樑, 等. 基于输出参数的光伏电池最大功率点控制 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (2): 148-152.
- [6] 张聪誉, 陈民铀, 罗辞勇, 等. 基于多目标粒子群算法的电力系统无功优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (20): 153-158.
- [7] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 基于改进遗传模拟退火算法的无功优化 [J]. 电网技术, 2007, 31 (3): 13-18.
- [8] 刘钰玉. 计算排序法及其应用 [J]. 计算机技术, 1998, 11 (4): 24-28.
- [9] 顾威, 李兴源, 王渝红, 等. 基于改进粒子群算法的次同步阻尼控制器设计 [J]. 电网技术, 2010, 34 (8): 52-56.
- [10] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (1): 33-39.
- [11] 刘述奎, 陈维荣, 李奇, 等. 基于随机聚焦粒子群算法的电力系统无功优化 [J]. 电网技术, 2008, 32 (S2): 8-11.
- [12] 多靖赞. 基于免疫克隆选择算法的多目标无功优化 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

(收稿日期: 2014-09-08) EA