

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.03.005

基于DGM的油浸式变压器热点温度计算

律方成¹, 马 伦¹, 王 柳², 万 涛², 杨东星¹, 马 雁²

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071000;

2. 国网河南省电力公司驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为了准确计算油浸式变压器的热点温度,在对比了有限元法(FEM)和有限体积法(FVM)计算变压器热点温度各自特点的基础上,提出了基于间断式伽辽金方法(discontinuous Galerkin method,DGM)的一种计算变压器热点温度的全新计算方法;并以天威合肥变压器厂的一台180 MV·A-220 kV变压器为例,计算了变压器的绕组热点温度。为校验计算方法的准确性,笔者对这台主变进行了变压器绕组温升试验,监测了绕组的热点温度数据,并将利用DGM的计算结果分别与实际监测数据、IEEE导则计算数据、使用FEM算法计算出的数据以及使用FVM算法计算出的数据进行了对比。对比结果表明,利用DGM的计算结果与实际监测数据的标准差只有1.46℃,而利用IEEE导则模型计算结果、FEM算法计算结果以及FVM算法计算结果与实际监测数据的标准差分别高达4.81、3.71、2.58℃。DGM的计算精度明显高于IEEE导则模型、FEM算法和FVM算法,证明了DGM能更准确地计算油浸式变压器绕组热点温度。

关键词: 油浸式变压器; 绕组热点温度; 间断式伽辽金方法(DGM)

Calculation of Winding Hot Spot Temperature of Oil Immersed Transformer by the Discontinuous Galerkin Method

LYU Fangcheng¹, MA Lun¹, WANG Liu², WAN Tao², YANG Dongxing¹, MA Yan²

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071000, China; 2. State Grid Electric Power Company of Henan Province Power Company in

Zhumadian, Henan Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to accurately calculate the winding hot spot temperature field of oil immersed transformers, on the basis of comparison of the finite element method (FEM) and finite volume method (FVM) to calculate transformer winding hot spot temperature characteristics, a new method of discontinuous Galerkin method (DGM) based on discontinuous finite element method to calculate the winding hot spot temperature in transformer is proposed. Taking a 180 MV·A-220 kV transformer as example, the transformer winding hot spot temperature is calculated by use of DGM. In order to verify the accuracy of this calculation method, the winding temperature rise test of the transformer is carried out and the winding hot spot temperature are detected. The calculated results by DGM are compared to the detected data, calculated data by IEEE guide recommendation, by FEM method and by FVM method. The contrast results show that the standard error between the calculated value by DGM and the detected value is only 1.46℃; while the errors corresponding to the IEEE guide method, FEM method and FVM method are 4.81℃, 3.71℃ and 2.58℃ respectively. The calculation accuracy of the hybrid algorithm (DGM) is significantly higher than the other methods, which means that the internal

收稿日期:2014-10-17; 修回日期:2014-11-23

基金项目:国家863计划课题项目(2012AA050802);中央高校基本科研业务费项目(13MS73);国家电网科技项目。

Project Supported by National 863 Program Project (2012AA050802), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13MS73), State Grid Sensor Fusion Technology and a Equipment Research and Application.

temperature field of this hybrid method can accurately calculate the winding hot spot temperature of the oil immersed transformer.

Key words: oil immersed transformer; winding hot spot temperature; discontinuous Galerkin method (DGM)

0 引言

油浸变压器内部结构复杂,其内部传热和散热机理复杂且难以计算,变压器内部绕组热点温度更是难以预测^[1-4]。目前对于变压器内部温度场的计算一般分为两类:一类是建立变压器的热路模型^[6-12];一类是利用数值计算方法并借用计算机进行辅助计算^[13-16]。

现阶段,对于变压器绕组热点温度的数值计算方法主要分为两类,一类是利用有限元法对变压器内部温度场进行二维和三维的计算^[13-16]。2006 年 Kurt Preis 等建立了电力变压器电磁热耦合方程,应用有限元方法仿真得到了变压器温度场分布;中国的汪娟娟、张尧等基于传热学与流体力学原理建立了干式变压器内部温度场和空气流体场的有限元模型,应用 ANSYS 的流—固耦合功能对其进行了热分析;井永腾以传热学以及流体力学为基础,应用有限元法,分析了大型油浸式变压器在不同冷却方式和不同冷却介质下顶层油温升以及热点温度,能很好地模拟变压器现场运行情况;崔国民、李瑜等采用 FLUENT 软件数值模拟了油浸式变压器内部传热与流动情况,获取其内部速度场与温度场;但因为有限元对于处理流体方面的计算能力有限,对网格精度依赖性过高,故这些应用有限元法的计算误差均相对较大且占用计算机资源^[15-16]。后来一种常用的计算方法是利用在有限元法的基础上发展起来的有限体积法对变压器的内部温度场以及绕组热点温度进行计算^[17-18];重庆大学的陈伟根、孙才新等采用控制体积法(FVM),通过求解一组代表流—固—热耦合的微分方程,结合变压器的边界条件与初始条件,计算获取绕组的二维温度分布^[18],此方法相对误差能在 5%左右;有限体积法虽然适合流体计算,但是其计算精度有限,一般只有二阶。鉴于此,针对变压器绕组热点温度的计算提出一种改进的方法成为必要。

笔者在分析了油浸式变压器的热传递过程和现有的变压器内部温度场的数值计算方法的基础上,采用了间断式伽辽金方法(DGM)对变压器内部温度场进行计算,DGM 既保持了 FEM 和 FVM 的优点,又克服了其不足。计算结果表明,应用 DGM 计算的油浸式变压器绕组热点温度相对于 FEM 和

FVM 具备更高的精度。

1 利用 DGM 计算变压器温度场

1.1 DGM 的特点和在变压器温度场计算中的优势

DGM 是传统连续有限元法的创新形式、改进和发展。与传统有限元方法相比,DGM 具有两个显著特征:一是容许带有悬挂点的不相容网格剖分;二是有限元分片多项式在跨越单元交界面时没有连续性要求。这两个特性使得 DGM 在计算变压器内部温度场中具有以下几点良好的特性:①在变压器绕组热点温度计算中,使用 DGM,质量守恒、动量守恒以及能量守恒定律可以在单元上满足,而且数值解具有很高的分辨率,这样便增加了变压器绕组温度场的计算精度,而绕组是变压器的主要发热源,绕组部分的高计算精度大大提高了整个温度场的计算精度;②DGM 适用于处理不同介质的物理问题,使得绕组铁心和油流之间的传热计算变得更加方便,绕组和铁心属于固体传热,而变压器油流属于流体传热,DGM 的这一特点使得绕组和油流之间的传热计算变得更加方便;③DGM 能够实现局部网格加密和各单元多项式的独立选取,利用这一特性,可以对变压器的主要发热体——绕组进行局部网格的加密处理,使绕组部分的热传递计算更加精确;④由于各个单元自由度之间的联系较弱,它所产生的离散方程组也具有良好的并行计算结构。利用这一特点,变压器温度场的一系列离散方程组可以在计算机上很好地实现多核并行计算有效地提高计算绕组热点温度的速度^[17-20]。

综合以上优点,DGM 既保留了 FEM 计算精度高的特点,同时由于近似解的间断性假设,对网格正则性要求不高,不需要考虑像一般有限元方法中连续性的限制条件就可以对网格进行加密或减疏处理,克服了 FEM 计算方法对网格精度过分依赖的弱点;同时 DGM 计算方法克服了 FVM 中通过扩大节点模板计算剖分单元交界面处的流通量的方法来提高精度不足的弱点,提高了计算速度和计算精确度。因此,非常适用于油浸式变压器内部温度场计算。

1.2 利用 DGM 求解变压器的热传递过程

变压器的绕组和铁心的热传递属于金属的热

传导范畴。热传导的微分方程遵循能量守恒定律

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \Phi_v. \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为物体的密度; c 为比热; v_x, v_y, v_z 分别为沿着各坐标的速度分量; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为沿着各坐标的导热系数; Φ_v 为单位体积的生热率。假设不考虑质量传递,且温度为稳态时,式(1)可简化为

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = -\Phi_v. \quad (2)$$

式(2)中: λ 为沿着各坐标的导热系数; Φ_v 为单位体积的生热率。

在计算内部热源时,将变压器的发热部分作为等效热源,并假设该热源总发热量不变,是一个均匀发热体。单位热源的体积热率可由式(3)求得

$$q_v = p/V. \quad (3)$$

式(3)中: p 为变压器的总体损耗; V 为热源的体积。文中所用模型各部分损耗数据见表1。

表1 变压器损耗量

Table 1 Loss of transformer

参数	铁心	低压绕组	中压绕组	高压绕组
总损耗/kW	105.45	—	5 871.89	6 881.12
体积热率/(W·m ⁻³)	19 136.15	—	75 357.32	61 524.33

考虑到变压器内部的油流过程,其传热过程是一个对流占优反应扩散方程,其基本格式为^[21]

$$-\nu \Delta T + b \nabla T + c T = f, x \in \Omega. \quad (4)$$

式(4)中: $\Omega \subset R^3$ 为有界区域; $v(x) = (v_x, v_y, v_z)^T$ 为扩散系数向量函数,其中 v_x, v_y, v_z 分别为沿着各坐标的速度分量;对流向量函数为 $b(x) = (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)^T$,其中 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为沿着各坐标的导热系数; c 为反应项系数。

设 $T \in H^3(\Omega)$ 是方程(4)的解,则 $\sigma = \Delta T$ 和 T 满足混合变分方程为:

$$\int_K \nu \sigma \cdot \nabla v dx - \int_{\partial K} \nu \sigma \cdot \nabla n v ds - \int_K u b \cdot \nabla v dx + \int_K (c - \text{div} b) u v dx + \int_{\partial K} b \cdot n \hat{u}_K v_h dx = \int_K f v dx, v \in H(K); \quad (5)$$

$$\int_K \sigma \cdot \tau dx + \int_K u \nabla \cdot \tau dx - \int_{\partial K} u \tau \cdot n ds = 0, \tau \in H(K). \quad (6)$$

根据此定义变压器温度场问题的间断有限元近似为:求 $(u_h, \sigma_h) \in S_h \times V_h$ 满足

$$\int_K \nu \sigma_h \cdot \nabla v_h dx - \int_{\partial K} \nu \hat{\sigma}_K \cdot n v_h ds - \int_K u_h b \cdot \nabla v_h dx + \int_K (c - \text{div} b) u_h v_h dx + \int_K b \cdot n \hat{u}_K v_h ds = \int_K f v_h dx, v \in S_h; \quad (7)$$

$$\int_K \sigma_h \cdot \tau_h dx + \int_K u_h \cdot \nabla \tau_h dx - \int_{\partial K} \hat{u}_K \tau_h \cdot n ds = 0, \tau_h \in V_h. \quad (8)$$

式(7)、(8)中 $\hat{u}_K$ 和 $\hat{\sigma}_K$ 为数值通量。选取不同的数值通量就得到不同的间断有限元格式,由于变压器内部温度场是对流占优问题,故可选取数值通量为 $\hat{u}_K = u_h, \hat{\sigma}_K = (\nabla u_h)^\wedge - v^\wedge [(u_h)^\wedge - u_h] b$ 。在式(8)中取 $\tau_h = \nabla v_h$ 并利用Green公式得到

$$\int_K \sigma_h \cdot \nabla v_h dx - \int_K \nabla u_h \cdot \nabla v_h dx - \int_{\partial K} (u_h - \hat{u}_K) \nabla u_h \cdot n ds = 0, \tau_h \in V_h. \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)可得 u_h 满足的方程

$$\int_K v \nabla u_h \cdot \nabla v_h dx - \int_{\partial K} (u_h - \hat{u}_K) \nabla u_h \cdot n ds - \int_{\partial K} v \hat{\sigma}_K \cdot n v_h ds - \int_K u_h b \cdot \nabla v_h dx + \int_K (c - \text{div} b) u_h v_h dx + \int_{\partial K} b \cdot n \hat{u}_K v_h ds = \int_K f v_h dx, v_h \in S_h. \quad (10)$$

此式关于 $K \in T_h$ 求和得到变压器温度场的间断有限元方程格式

$$v B(u_h, v_h) + b(u_h, v_h) = (f, v_h), \forall v_h \in S_h. \quad (11)$$

式(11)中的 $b(u_h, v_h)$ 双线性形式为

$$b(u_h, v_h) = - \int_{\Omega} u_h b \cdot \nabla v_h dx + \int_K (c - \text{div} b) u_h v_h dx + \sum_{K \in T_h} \int_{\partial K} b \cdot n \hat{u}_K v_h dx. \quad (12)$$

通过基本的双线性形式 $B(u_h, v_h)$ 和 $b(u_h, v_h)$ 的双线性形式代入变压器温度场的DGM式(11)中,最后利用DGM迭代求解出变压器的温度场及绕组的热点温度值。

2 DGM 三维温度场计算结果

笔者针对天威合变的一款180 MV·A-220 kV自然油循环风冷变压器,运用DGM计算了此变压器的内部三维温度场。变压器油和绕组铁心的物理参数均按实际参数设置。

变压器网格的划分主要分为两类:其一是绕组、铁心和散热片,这是变压器的主要发热体和散热体,对网格精度要求较高。考虑到绕组和铁心部分结构较为规则,故采用了高精度的六面体网格划分方式(sweep)。其二是变压器的油流部分,此部分运用DGM进行计算,对网格精度依赖性不高,故采用网格渐变划分方式。最终划分网格数量为4 789 846个,变压器的网格划分效果见图1。

与后续的变压器温升试验数据进行对比,同样的,在利用DGM法计算时,假设低压绕组开路的情况进行计算。当环境温度为15℃,负载为额定负

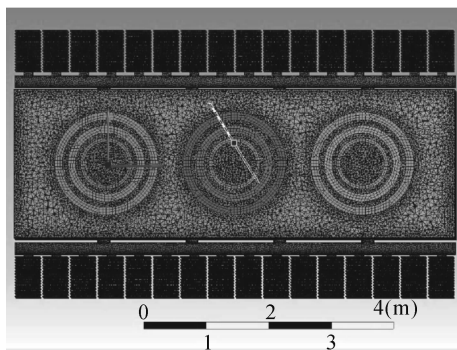


图 1 变压器网格划分水平切面图

Fig. 1 Diagram of a transformer mesh horizontal sections

载时,计算变压器的内部温度场。假设变压器达到了热平衡状态,利用 DGM 计算出的三相三绕组温度结果见图 2。由图 2 可以看出,其绕组热点温度位置处于绕组高度的 9/10 位置处,热点温度出现在 9 号绕组上,且最高温度和最低温度相差达 18.2℃。中压绕组和高压绕组的热点温度依次为 90.43、84.23℃。其绕组的温度分布云图见图 3。

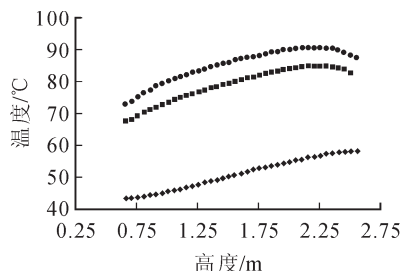


图 2 变压器绕组的温度随高度的分布示意图

Fig. 2 Distribution of transformer winding temperature with height

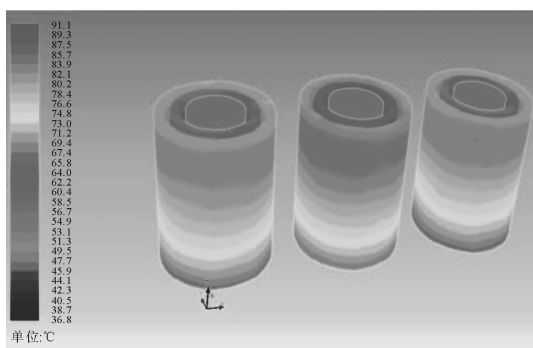


图 3 变压器绕组温度分布云图

Fig. 3 Distribution of transformer winding temperatures

环境温度为 15℃, 负荷为额定负荷时, 变压器油流的温度分布云图见图 4。由图 4 可以看出, 变压器顶层温度最高, 高达 67.65℃, 底层温度最低, 为 50.94℃。

3 变压器温升试验

为了检验计算结果的准确性,以实际变压器为

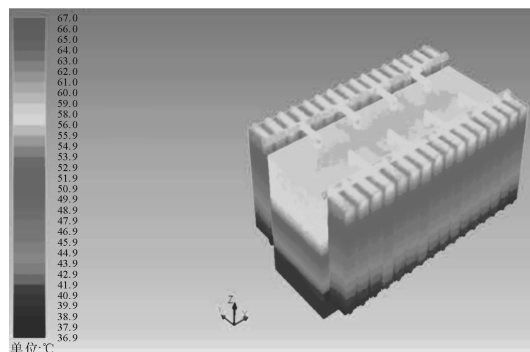


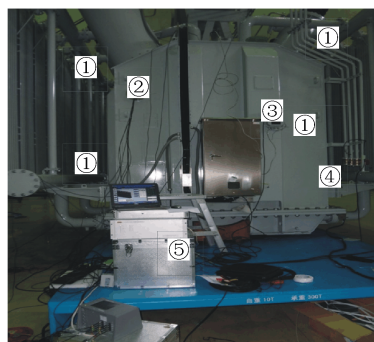
图 4 变压器油流的温度分布云图

Fig. 4 Distribution of transformer oil flow temperatures

准,在天威集团合肥分厂进行了变压器的温升试验。此变压器是天威合变生产的 180 MV·A-220 kV 的自然油循环风冷三绕组变压器,通过温升试验以测量出绕组的热点温度。

3.1 温升试验原理及过程

测量 B 相电流信号,取 1 个顶层油温度,1 个环境温度信号和 4 个冷却汇流管油温度信号;取 8 路光纤测温信号测量绕组热点温度。温升实验装置及测量装置位置见图 5。由于低压主要是用于厂内用电以及农用电,负载比较低,从而低压绕组温升一般比较低,因此,只在中压线圈以及高压线圈中埋设了光纤传感器,根据计算机仿真结果可知,热点位置为中压 9 号垫片和高压 9 号垫片,温升试验中测得的数据有:B 相中压热点温度、B 相高压热点温度、顶层油温、环境温度、高压汇流管上下口温度、低压汇流管上下口温度。



①—4个汇流管温度传感器位置;
②—绕组热点光纤出口盘;
③—顶层油温监测表;④—环境温度传感器位置;
⑤—监控设备(TSD6101(上)TSD6102(下))。

图 5 温升试验装置示意图

Fig. 5 Schematic temperature rise test

3.2 温升试验结果

实验过程记录数据见表 2。为了进一步获得过负荷时绕组的热点温度数据,紧接着额定负荷试验,进行了变压器绕组的过负荷温升实验,实验结果见表 3。

表2 施加额定负荷时所记录的温度数据

Table 2 The temperature of the recorded data on the rated load

时间	高压 B 相 电流/A	环境 温度/℃	顶层 油温/℃	B相中压 9 号 垫片/℃	B相高压 9 号 垫片/℃	B相中压 9 号垫 片温升/℃	B相高压 9 号垫 片温升/℃
2013-08-01T24:37	574	14.09	26.94	30.38	27.50	16.29	13.41
2013-08-01T24:54	551	14.04	30.35	71.67	65.20	57.63	51.16
2013-08-02T01:23	542	14.39	41.61	77.49	72.20	62.81	57.81
2013-08-02T01:52	546	14.76	47.76	82.31	77.79	67.55	63.03
2013-08-02T02:20	538	15.03	50.46	84.66	78.40	69.63	63.37
2013-08-02T02:47	543	15.29	53.12	85.23	79.66	69.94	64.37
2013-08-02T03:12	530	15.11	54.97	88.29	82.80	73.18	67.69
2013-08-02T03:43	523	15.16	56.51	89.05	83.43	73.89	68.27
2013-08-02T04:12	532	15.03	57.09	89.30	83.27	74.27	68.24
2013-08-02T04:47	532	15.05	57.79	89.76	83.52	74.71	68.47
2013-08-02T05:17	531	15.16	58.45	90.41	83.58	75.25	68.42
2013-08-02T05:45	522	15.29	58.92	90.72	83.68	75.43	68.39
2013-08-02T06:13	521	15.40	59.03	91.08	84.02	75.68	68.62
2013-08-02T06:40	520	15.51	59.56	91.34	84.25	75.83	68.74
2013-08-02T06:53	520	15.58	59.67	91.44	84.44	75.77	68.86
2013-08-02T07:31	520	15.18	60.23	90.81	83.95	75.83	68.77
2013-08-02T08:00	520	15.18	60.13	91.00	84.14	75.78	68.96
2013-08-02T08:10	520	14.63	60.05	90.44	83.75	75.83	69.12
2013-08-02T08:36	520	14.44	59.01	90.25	83.48	75.81	69.04

表3 变压器1.4倍过负荷试验时所记录的温度数据

Table 3 The temperature of the recorded data on the 1.4 rated load

时间	高压 B 相 电流/A	环境 温度/℃	顶层 油温/℃	B相中压 9 号 垫片/℃	B相高压 9 号 垫片/℃	B相中压 9 号垫 片温升/℃	B相高压 9 号垫 片温升/℃
2013-08-02T08:36	520	14.44	59.01	90.25	83.48	75.81	69.04
2013-08-02T08:58	520	15.01	45.10	90.85	84.20	75.84	68.92
2013-08-02T09:26	541	15.18	46.47	92.01	85.87	76.83	69.61
2013-08-02T09:52	562	15.47	46.92	95.26	86.49	79.79	71.52
2013-08-02T10:20	569	15.54	47.30	97.34	88.70	81.80	73.16
2013-08-02T10:46	569	15.54	47.70	102.35	94.96	86.81	79.42
2013-08-02T11:09	569	15.75	48.08	106.08	98.14	90.33	82.39
2013-08-02T11:34	569	16.38	48.28	110.23	102.37	93.85	85.99
2013-08-02T11:58	569	16.71	51.30	110.90	103.40	94.19	86.69
2013-08-02T12:21	569	16.99	54.20	111.15	103.60	94.16	86.61

从上述实验数据可以看出,施加额定负荷 520 A 后最终 B 相中、高压 9 号垫片温升稳定在 75.81、69.04 ℃。在 1.2 倍过负荷时,最终 B 相中、高压 9 号垫片温升基本稳定在 94.16、86.61 ℃。

4 计算结果与实验结果的比较

通过上述的温升试验数据,对试验中的监测数据与利用 DGM 计算出的绕组温度结果进行了对比。由于温升试验的环境温度基本处于 15 ℃,在计算中也假设环境温度为 15 ℃。在额定负荷和 1.2 倍

负荷下,利用 DGM 计算得出的 B 相中压绕组热点温度温升分别为 74.19 ℃和 92.86 ℃;B 相高压绕组热点温升分别为 67.95 ℃和 86.01 ℃。而实验测得的 B 相中压绕组数据在额定负荷和 1.2 倍负荷下的温升分别为 75.81 ℃和 94.16 ℃;B 相高压绕组数据为 69.04 ℃和 86.61 ℃。对比结果表明,利用 DGM 算法计算出的绕组热点温度,能够很好地吻合实际运行中的变压器监测数据,标准差为 1.46 ℃。

为了进一步比较 DGM 算法的优越性,同样地,在使用相同物理模型和网格划分的基础上,对变压

器温度场分别运用 IEEE 导则、FEM、FVM 进行了内部温度场计算。3 种计算方法与温升试验中的监测数据对比见表 4。

表 4 实际监测结果和利用 IEEE 导则、DGM 算法、FEM 算法、FVM 算法的计算结果对比

Table 4 The actual monitoring results and using the IEEE guide, DGM algorithm and FEM and FVM algorithm calculation results of contrast $^{\circ}\text{C}$

计算方法	额定负荷 B 相中压 绕组热点 温升	1.2 倍负 荷 B 相 中压绕组 热点温升	额定负荷 B 相高压 绕组热点 温升	1.2 倍负 荷 B 相 高压绕组 热点温升	额定负荷 和 1.2 倍 负荷与试 验数据对 比标准差
温升试验	75.81	94.16	69.04	86.61	—
IEEE	71.41	87.64	65.42	80.21	4.81
FEM	72.11	90.44	66.34	83.12	3.71
FVM	73.12	91.69	66.32	84.96	2.58
DGM	74.19	92.86	67.95	86.01	1.46

5 结论

1) IEEE 导则推荐的热模型所研究的变压器绕组热点温度是一种名义上的热点温度, 这种简化为节点的温度值并非物理意义上某一点的温度值, 只是具有数学意义。这种将变压器内部复杂的热过程简化为一点的计算模型实际使用时存在较大误差是必然的, 尤其在变压器超额定值过载情形下, 导则推荐模型对绕组热点温度的预测结果要比实际监测的热点温度低很多。此外, 导则推荐的基于一阶导数模型, 假设温度随高度呈严格的线性化。它并没有考虑环境条件的地区差异性与动态变化特性, 使得其在在线监测顶层油温中精度不够, 从而导致基于顶层油温的热点温度计算结果有较大误差。

2) FEM 算法虽然计算精度可以设置, 但是其更适于计算结构规则的固体传热。而且 FEM 算法对于网格精度要求过高, 在大型油浸式变压器中, 网格密度不可能做得很高, 所以会对 FEM 计算方法的计算精度产生影响, 导致其误差相对较大。

3) FVM 算法对网格要求没有 FEM 算法依赖性强, 加上 FVM 在计算复杂流体时更有优势, 所以其计算精度要高于 FEM 算法。但由于 FVM 算法的精度一般只有二阶, 影响了计算精度, 故其误差也相对较大, 但一般低于 FEM 算法。

4) DGM 算法结合了 FEM 和 FVM 两种算法的优势, 又克服了两者的不足。DGM 既保留了 FEM 计算精度高的特点, 同时由于近似解的间断性假设,

对网格正则性要求不高, 不需要考虑像一般有限元方法中连续性的限制条件就可以对网格进行加密或减疏处理, 克服了 FEM 计算方法对网格精度过分依赖的弱点; 同时 DGM 计算方法克服了 FVM 中通过扩大节点模板计算剖分单元交界面处的流通量的方法来提高精度的不足的弱点, 提高了计算速度和计算精确度, 故 DGM 非常适用于油浸式变压器绕组热点温度的计算。

参考文献:

- [1] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [2] IEEE. Std C57. 91—1995 Guide for loading mineral-oil-immersed transformers[S]. 1996.
- [3] IEEE. Std 1538—2000 Guide for determination of maximum winding temperature rise in liquid-filled transformers [S]. 2000.
- [4] 刘文泽, 蔡泽祥, 黄松波, 等. 高压电力电容器内部最热点温度的计算模型[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 82-84. LIU Wenzhe, CAI Zexiang, HUANG Songbo, et al. Calculation model of HV power capacitor internal hottest-spot temperature[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 82-84.
- [5] GALDI V, IPPOLITO L, PICCOLO A, et al. Neural diagnostic system for transformer thermal overload protection [C]//IEEE Proceedings Electric Power Applications.[S.l.]: IEEE, 2000: 415-421.
- [6] GALDI V, IPPOLITO L, PICCOLO A, et al. Application of local memory-based techniques for power transformer thermal overload protection[J]. IEEE Proceedings Electric Power Applications, 2001, 148(2): 163-170.
- [7] SWIFT G, MOLINSKI T S, BRAY R, et al. A fundamental approach to transformer thermal modeling-Part II: Field verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 176-180.
- [8] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN W. A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
- [9] SWIFT G W, ZOCHOLL S E, BAJPAI M, et al. Adaptive transformer thermal overload protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 516-521.
- [10] LESIEUTRE B, HAGMAN W, KIRTLEY J. An improved transformer top oil temperature model use in an on-line monitoring and diagnostic system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 249-256.
- [11] TYLAVSKY D J, QING He, JENNIE S, et al. Transformer

- top-oil temperature modeling and simulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(5): 1219-1225.
- [12] 陈伟根, 苏小平, 陈曦, 等. 变压器顶层油温预测热模型影响因素分析及其改进[J]. 高电压技术, 2011, 37(6): 1329-1335.
- CHEN Weigen, SU Xiaoping, CHEN Xi, et al. Influence factor analysis and improvement of the thermal model for predicting transformer top oil temperature[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1329-1335.
- [13] SKILLEN A, REVELL A, IACOVIDES H, et al. Numerical prediction of local hot-spot phenomena in transformer windings[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 36(1): 96-105.
- [14] WAKIL N E, CHERECHES N C, PADET J. Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(6): 615-626.
- [15] 井永腾, 李岩. 额尔和木巴亚尔. 高压自耦变压器的涡流损耗计算与屏蔽措施[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1988-1990.
- JING Yongteng, LI Yan. Eddy current losses calculation and shields of high voltage auto-transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1988-1990.
- [16] 李剑, 刘兴鹏, 王有元, 等. 以箱壁温度为判据的油浸式变压器绕组热点温度计算模型及试验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2344-2349.
- LI Jian, LIU Xingpeng, WANG Youyuan, et al. Model of hot spot temperature in oil-immersed transformers using temperature estimation of tank wall[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2344-2349.
- [17] GASTELURRUTIA J, RAMOS J C, LARRAONA G S, et al. Numerical modelling of natural convection of oil inside distribution transformers[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(4): 493-505.
- [18] 陈伟根, 苏小平, 孙才新, 等. 基于有限体积法的油浸式变压器绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 23-27.
- CHEN Weigen, SU Xiaoping, SUN Caixin, et al. Temperature distribution calculation based on FVM for oil-immersed power transformer windings[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 23-27.
- [19] 陈二云, 赵改平, 马大为. 冲击射流的间断有限元仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2010(12): 2791-2794.
- CHEN Eryun, ZHAO Gaiping, MA Dawei. Simulation of impinging jet using discontinuous finite element method[J]. Journal of System Simulation, 2010(12): 2791-2794.
- [20] 张磊, 袁礼. 龙格库塔间断有限元方法在计算爆轰问题中的应用[J]. 计算物理, 2010, 27(4): 509-517.
- ZHANG Lei, YUAN Li. Runge-Kutta discontinuous galerkin method for detonation waves[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2010, 27(4): 509-517.
- [21] 吴迪, 蔚喜军. 自适应间断有限元方法求解三维欧拉方程[J]. 计算物理, 2010, 27(4): 492-500.
- WU Di, YU Xijun. Adaptive discontinuous galerkin method for euler equations[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2010, 27(4): 492-500.
- 律方成(1963—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断技术。
- 马伦(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备的在线监测与故障诊断(通信作者)。