[变压器]

基于热路模型的变压器负荷智能系统研究

文/中国石油集团电能有限公司　闫宝庚

突破传统保守的变电运行及调度控制管理模式，提出变压器负荷智能管理方案及动态负荷调度控制策略，基于先进成熟的计算机及信息通信技术，建立并优化变压器热路模型算法，通过实时在线监测信息的采集和分析，提升重点区域变压器的承载能力，具有非常广阔的应用前景。

随着油田产能的不断提升，用户对用电量的需求连年加大，通过对某油田电网近五年32座110 kV变电所的负荷统计，约30% 的110 kV主变压器负荷高峰时段接近满载运行，在转带负荷时个别变压器需要超载运行，受传统承载能力制约被迫限电，而油浸式电力变压器作为电力系统中的核心设备，其运行容量直接影响着整条电网的输电能力。所以，亟需研究提升重点区域电网变压器的承载能力。

若能够通过对变压器各参数进行实时监测，预测到当前负载下的变压器内部最热点温度，就可以降低裕度，有效提高变压器运行容量及利用率。然而除却少数事先埋设光纤或热电偶的变压器，绝大多数运行中的油浸式电力变压器的内部温度都难以获取。因此，如果能够通过获取变压器实时运行数据和环境参数，来对变压器内部温度的求取方法进行研究，得到变压器最准确的顶油和热点温度值，对提高变压器运行容量、提升电网输电能力具有重要的意义。

变压器热路模型

变压器热路模型技术是通过对变压器发热损耗的温度修正、不同运行方式下损耗求取、油黏度、密度温度修正、计及太阳辐射因素和散热热阻求取，在此基础上，建立其分布参数的热路模型。求解有限元方程，得到其温度场和热气流场的分布。如图1所示。

$$\theta_h=\theta_a+\Delta\theta_{br}\left(\frac{1+RK^2}{1+R}\right)^x+2\left[\Delta\theta_{imr}-\Delta\theta_{br}\right]K^y+Hg_rK^y \quad (1)$$

式中，θ_h为热点温度，℃；θ_a为环境温度，℃；$\Delta\theta_{br}$为底部油温升；$\Delta\theta_{imr}$为油平均温升；R为额定条件下变压器高一中一低三侧负载损耗与空载损耗之比；H为热点系数；g_r为额定电流下绕阻平均温度对油（油箱内）平均温度的梯度；K为负载电流标幺值；x为油的指数；y为绕阻指数。

利用该模型经修正后求解不同负载条件下绕组的温度分布，并将有限元法计算值和实测值进行比较，研究变压器的温度特性对负载率的影响。

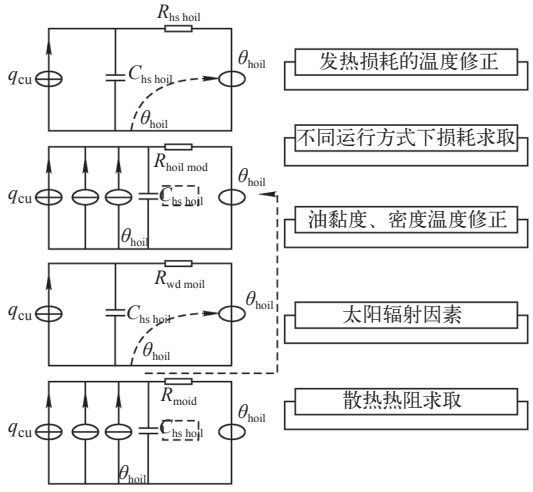

图1　变压器分布参数的热路模型

变压器热点稳态温度和暂态温度为

$$\Delta\theta_{bt}=\Delta\theta_{bi}+(\Delta\theta_{bu}-\Delta\theta_{bi})(1-e^{-t/\tau_0}) \quad (2)$$

式中，$\Delta\theta_{bi}$为起始的底层温升；$\Delta\theta_{bt}$为时间t内所加负载的暂态底部油温升；$\Delta\theta_{bu}$为时间t内所加负载的稳态底部油温升；τ_0为油时间常数。

按照变压器热点温度核心计算公式，充分考虑变压器箱体热量与自然界中风速、日照辐射的热交换过程环境温度和风等因素进行充分考虑，生成热路仿真模型。

变压器负荷智能管理系统

变压器负荷智能管理系统由数据采集通信层、数据存储管理层、应用服务层和数据表示层组成，如图2所示。数据采集通信层是系统的数据入口，通过RS485网络通信方式从现场微气象及温度传感等获取现场实时信息；通过调度自动化管理系统OPEN3000实时推送获取的实时运行信息。数据存储层主要是数据库，存储和管理系统数据。应用服务层包括数据归档、模型计算和Web服务等。数据表示层就是系统的用户界面。系统采用B/S结构，用户通过浏览器访问系统。

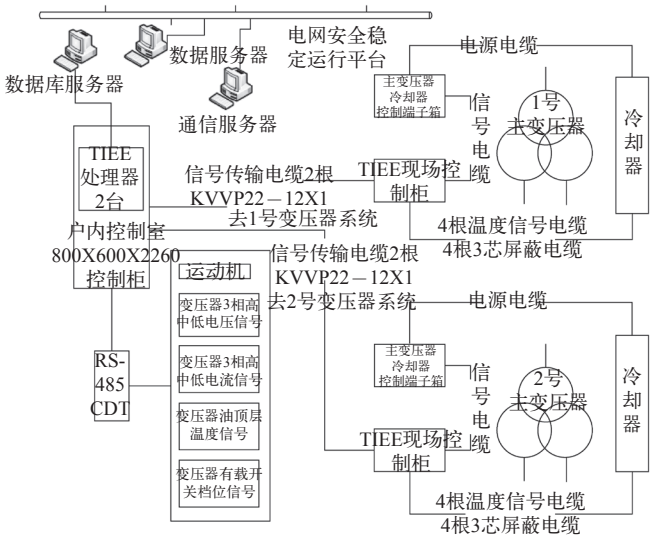

图2　负荷智能管理系统

1．实现自适应过负荷保护

根据实时监测的变压器负荷电流、顶油温度及变压器绕组最热点温度值，综合分析绕组温升与实时运行负荷之间的变化规律，研究综合电流型过负荷和绕组温度型过负荷的协同预警机制，制定变压器热过负荷预警策略，最终形成自适应热过负荷继电保护策略。即通过实时计算分析绕组最热点温度、预测温升变化趋势，结合实时运行负荷的变化规律，运用变压器已有的顶油温度协同本系统的绕组热点温度预报预警系统，形成“或”逻辑闭锁电流型过负荷保护。当其中预警输出且过负荷动作时，在一定的时延后，发出热过负荷告警，其原理如图3所示。

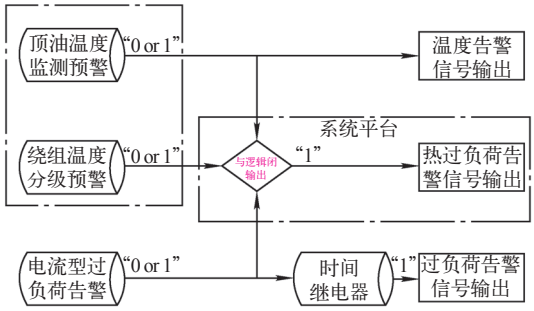

图3　逻辑方框图

研究正常过负荷电流、运行电压与事故状态下的故障电流、母线残压的变化机理及其内在向量关系，实现非故障情况下过电流保护元件的有效闭锁。虽然过电流整定值和动态热稳定限值（或$N-1$运行条件下动态增量电流）之间存在冲突，可能会引起继电保护误动作，但是，如果增加了复合电压闭锁逻辑功能，可有效地区分正常运行负荷电流及$N-1$运行条件下的动态增量电流与外部故障时的故障电流，实现保护的选择性动作。因为，$N-1$运行状态属非故障态，电压波动在正常允许的范围（≤±5%），而且运行负荷呈三相对称型增量，不会产生负序或零序分量，所以，即使电流元件启动了，但正序低电压和负序过电压元件均不会启动，从而实现保护元件的有效闭锁、避免继电保护装置的误动作。

2．变压器智能管理策略

变压器负荷智能管理系统严格依据GB 1094－2《电力变压器温升部分》和GB 1094－7《电力变压器 油浸式电力变压器负载导则部分》中的规定。遵循以下三个方面开发变压器负荷智能管理系统：

1）保证变压器的正常设计寿命的前提下，对变压器合理地安排过负荷，即正常过负荷。

2）在保证变压器绝缘不会受损，变压器不会发生突发事故的前提下，可以允许变压器在一定的时间内承受一定的过负荷。

3）GB 1094－2负载导则中规定的1.3（1.5）倍过负荷30 min，是在特定环境（环境温度20℃、初始负荷率为0.8）下确定的限值，实际上这两个值均为动态变化量，如图4所示。因此，本项目中的热路模型建模及算法开发时，就是在确保变压器本体

结构参数（即热路模型）准确的前提下，将初始负荷率和环境温度作为可变自变量，综合考虑日照、风速等可变气象条件，建立具有多元自变量的变压器绕组最热点温度复合函数（即算法），通过顶油温度、散热器上下油口温度等实测参数对算法的验证，在保障变压器正常设计寿命的前提下，量化安全过负荷倍数及安全运行时间，辅之以监测系统实时在线高温预警机制。

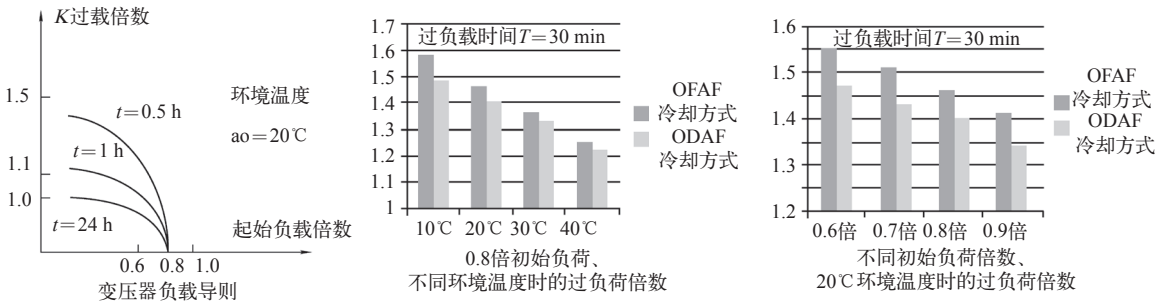

图4　变压器负载与环境温度关系

3．生成主变压器运行策略

通过在变电站安装在线监测装置及微气象装置，对站内气象参数（日照强度、环境温度和风速）和变压器及其间隔载流设备运行参数（运行电流、运行电压、顶油温度、分接头位置、散热器上下油口温度和设备线夹温度）进行实时监测；基于宋芳屯气象环境，优化变压器及其间隔载流设备的热路模型和算法，对采集的实时信息予以处理，确保在不突破GB/T 1094.7—2008《电力变压器第7部分油浸式电力变压器负载导则》规定和变电设备安全运行的前提下，通过重点区域电网变压器负荷智能调度管理平台实时展示运行值和预测值，即：当前运行条件下变压器长期安全运行的最大过负荷倍数；规定时间（30 min）内的最大过负荷倍数；1.3～1.5过负荷倍数下的最长安全运行时间；支持在线查询任意时间下的过负荷倍数及任意过负荷倍数下的运行时间。

某110 kV变电所单侧主变压器容量6.3万kV·A，共接带35 kV变电所16座，冬季负荷高峰期最高负荷达到12.5万kW，而且该系统不允许与另一系统进行合环，且所带负荷多为单电源线路，不能进行负荷的转移。按照传统的变电负荷调度管理方式（1.3～1.5倍过负荷状态下，最长运行30 min），限制了变压器的承载能力，无法满足$N-1$方式下供电负荷连续、安全和可靠运行的要求，被迫采取压、限或有条件转移负荷的方式，直接影响了原油生产。因此，对某主变压器负荷管理分析和风险评估，在确保变压器使用寿命和运行安全的前提下，实现并实时展示如下表运行值和预测值：①热点温度、线油温差等实时数据的监测和高温预警；②当前负荷及不同过负荷倍数下变压器所能达到的最大运行时间；③在规定的安全运行时间（30 min）内变压器所能达到的最大运行负荷；④变压器发生“$N-1$”运行方式时，实时给出变压器在当前环境和负荷情况下的过负荷安全运行时间。

表　变压器智能运行管理策略

1号主变压器智能运行管理策略										
规定顶层油温/℃	实测顶层油温/℃	规定热点温度/℃	实测热点温度/℃	线油温差/℃	当前负载率/(%)	实时工况运行时间/min	$N-1$运行时间/min	30 min内最大运行负荷	过负荷信号	运行状态
95	23.5	140	39.5	15.6	60	长期运行	45	76	1	正常
2号主变压器智能运行管理策略										
规定顶层油温/℃	实测顶层油温/℃	规定热点温度/℃	实测热点温度/℃	线油温差/℃	当前负载率/(%)	实时工况运行时间/min	N-1运行时间/min	30 min内最大运行负荷	过负荷信号	运行状态
95	25	140	42	13.2	75	长期运行	40	74	1	正常

结束语

本文突破传统保守的变电运行及调度控制管理模式，研究变压器负荷智能管理方案及动态负荷调度控制策略，基于先进成熟的计算机及信息通信技术，建立并优化变压器热路模型算法，通过实时在线监测信息的采集和分析，提升重点区域变压器的承载能力。具有非常广阔的应用前景。**EA**

（收稿日期：2018.09.05）
（编辑：朱金凤）