

局域电网负荷智能管理技术研究与应用

围绕动态增容的理念，通过实时监测设备负荷电流、运行温度和气象条件等数据并汇总，通过热路模型建模分析为动态增容及风险寿命提供数据支持。以动态增容决策为基础，结合潮流分析计算，为局域电网调度管理提供最优运行方式并对设备增容风险提出预警，最终实现基于热稳定极限的动态负荷监测与控制。

王永红¹ 钱文晓¹ 张俊双¹ 唐睿² 艾雷鸣²/1.国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院 2.上海海能信息科技有限公司



王永红/教授级高工

关键词/Keywords

动态增容 ·
变压器 ·
输电线路 ·

0 引言

随着国民经济的转型与发展，各地区电网用电量持续快速增长。与此同时，供电企业也不得不面对峰谷差变大、负荷率下降和高峰时段电力供应紧张等问题给电网安全运行带来的压力。然而，由于现有网架更新改造速度滞后于负荷增长速度以及相关管理和技术手段不能满足当前电网发展的因素，供电能力与发展之间的矛盾在某些地区和实际需求增长越来越明显了。因此，如何在现有电网基础上进一步挖掘电网输电能力、保障负荷高峰时段为用户提供可靠的电能是许多供电企业共同面对的问题。

通过调整变电设备的运行限制，能够合理提高变压器运行负荷，最大限度地利用变压器有效容量，大大提高设备运行效率。通过实时监测线路运行参数及气象条件来提高输电线路短时输送能力，此方法没有超越调度运行规程中导线允许的最大温度。目前，通过安装在线监测装置获取输变电设备状态信息及系统运行数据，对

设备进行增容的方式已得到业内的普遍认可。但仅从“设备”层面关注设备自身安全问题，缺乏对设备运行性能与电网运行安全之间关联的研究。本项目将以动态增容技术为核心，在保持现有输电线路和变电设备的基础上，研究覆盖输电线路和变电设备的运行温度、电流（负荷）、环境温度、风速和太阳辐射强度等多因素的在线监测技术，研究输电线路和变电设备的动态增容措施，提出动态负荷实时增容技术，为系统稳定运行的控制策略、调度方法提供依据。

1 输变电变压器

输变电变压器负荷管理技术的核心就是实时动态监控变压器热点温度。变压器动态增容的目的是要保证变压器在安全可靠运行的前提下来增大变压器运行容量，在变压器发生过负荷时做到提前预警。同时可为电力调度部门提供技术支持。

工程上监控输变电变压器热点温度的成熟方法主要是热路模型计算方式。主要是基于热场分布与电场分布都适用于泊松方程，那么电场和热场的相同之处就比较多，所以应该建立两者的联系，并进行分析。

以下是热流密度与温度场在内无热源导体中的导热现象，即

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (2)$$

式中， T 为温度； q 为热流密度； λ 为

导热系数。

描述导体中电流密度和恒定电场的方程为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

$$j = -\gamma \frac{dU}{dn} \quad (4)$$

式中, U 为电压; j 为电流密度; γ 为电导率。

对比式 (1) ~ 式 (4), 可以发现两者的数学表达式完全相同, 并且各参量有相同的量纲结构, 温度 T 用电压 U 来模拟, 热流密度 q 用电流密度 j 来模拟, 导热系数 λ 用电导率 γ 来模拟。

基于变压器顶层油温建立热路模型计算热点温度, 热点温度=环境温度+底层油温升+绕组热点区域与底层油之间的温度差+热点与热点区域之间的温度差。其中热点区域温度可近似理解为油顶层温度。图 1 为基于变压器油温的热路模型。

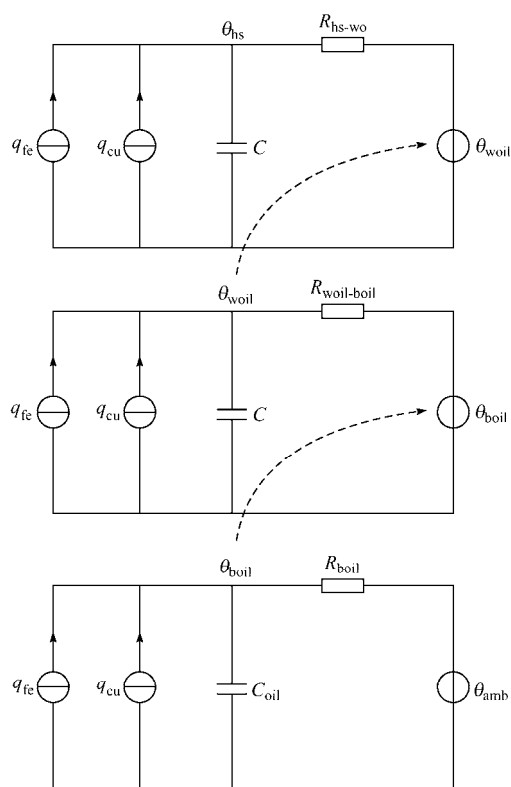


图 1 基于油温的变压器热点温度热路模型

图 1 中, q_{fe} 、 q_{cu} 分别为变压器空载损耗及负载损耗, 在热路模型中共同作为热源; C_{oil} 为传热物质的热容; R_{oil} 为传热物质热阻; θ_{amb} 为

环境温度; θ_{hoil} 为顶层油温。利用该模型, 首先基于环境温度计算出顶层油温 θ_{hoil} , 而后再将计算得来的顶层油温作为上一层模型的参考温度, 进一步计算热点温度值。

2 输电线路

2.1 架空线路

根据架空线路设计规程规范, 基于输电线路热路模型, 研究全天候气象条件下的线路实时过载能力及风险评估, 即限额时间下的安全运行电流或限额电流下的安全运行时间; 研究建立同一出线间隔电气设备与线路实时监测同步共享管理模块; 研究建立基于气象预报信息的线路容量日方式支持及未来 3 日方式预测模块。

架空导线发热量是由日照吸热和电流产热两部分组成, 散热方式主要依托于辐射散热和对流换热两部分, 当导线散热与产热在一个平衡状态时, 导体温度是趋于稳定的。导线处于稳态时热平衡公式为

$$W_j + W_s = W_R + W_F \quad (5)$$

式中, W_j 为单位长度导线电阻产生的发热功率, W/m; W_s 为单位长度导线的日照吸热功率, W/m; W_R 为单位长度导线的辐射散热功率, W/m; W_F 为单位长度导线的对流散热功率, W/m。

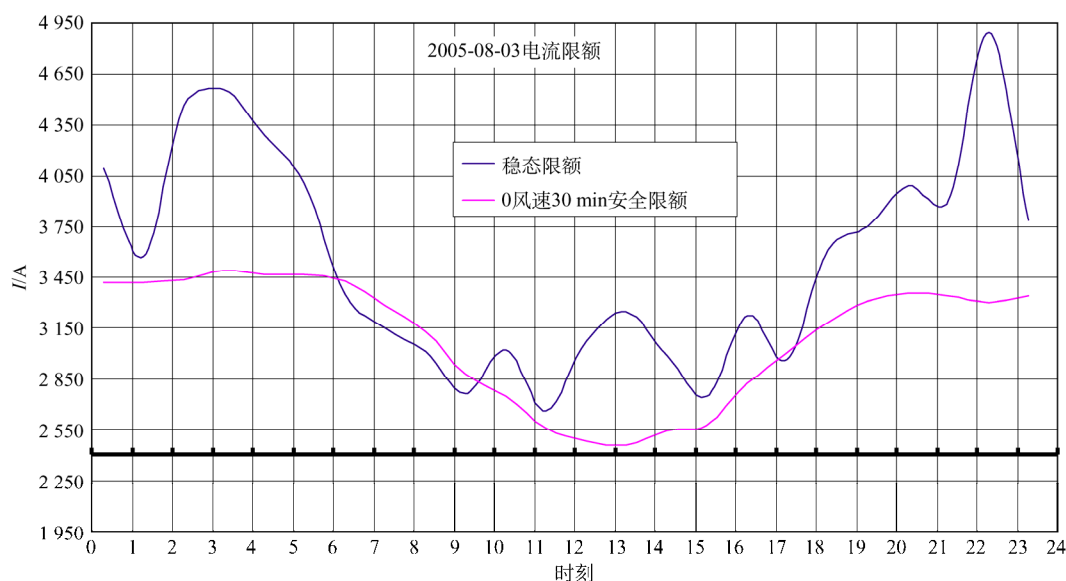
通过测量导线周边的环境温度、有效风速、太阳辐射强度、导线电流和导线温度就可计算出导线允许的最大工作电流。利用动态监测增容技术提高输电线路输送容量最主要是要如何对增容之后的风险进行预警评估。

为了避免发生增容风险, 设定线路处于“N-1”状况后, 太阳辐射强度和环境温度不发生任何改变, 而风速设为 0, 并同时考虑导线的温升过程, 规定 70 °C 为导线的最高允许工作温度, 将 80 °C 设为静态线路中断允许的最高工作温度, 给定以下 4 种计算方法作为调度人员的工作指导方法。

2.1.1 方法 1: 计算出输电线路在 30 min 之后的最大载流量 (由安全时间计算电流限额)

设置导线温度限额为 70 °C (或 80 °C), 安全时间为 30 min, 计算: 在出现“N-1”状况后, 气象条件发生劣化 (风速降为 0), 导线温度在规定的安时间 (30 min) 内不会发生超限。

如图 2 所示,这是根据 2011 年 8 月 3 日实测数据和该模型计算得出该天出现“N-1”状况的不同时刻(在 30 min 内)导线温度不突破设置的温度限额(70℃)的安全电流限额。



注:最高温度为 35.5℃,最高日照强度为 770 W/m²,最低风速为 0 m/s

图 2 30 min 内安全限额

如果发生“N-1”状况,潮流发生转移,运行电流突然增加,如果增加后的运行电流小于该安全电流限额,表明至少在 30 min 内,线路仍可以安全运行,运维部门可以利用这段时间来对事故进行处理。

2.1.2 方法 2: 计算导线在规定的限额内最大的运行安全时间

设置导线温度限额为 70℃(80℃),运行电流限额为 3150 A。在出现“N-1”状况后,气象条件发生急速劣化,在运行电流限额下,导线温度不会超过限额的安全运行时间。

如图 3 所示,这是根据 2011 年 8 月 3 日实测数据和该模型,计算得出该天出现“N-1”状况的不同时刻,在 3150 A 电流下,导线温度不突破设置的温度限额(70℃)的安全时间。

如果发生“N-1”状况,潮流发生转移,运行电流突然增大,但仍然在计算的安全时间内,导线温度不会超过设置的温度限额,线路就仍可以安全运行,运维部门可以利用这段时间来对事故进行处理。

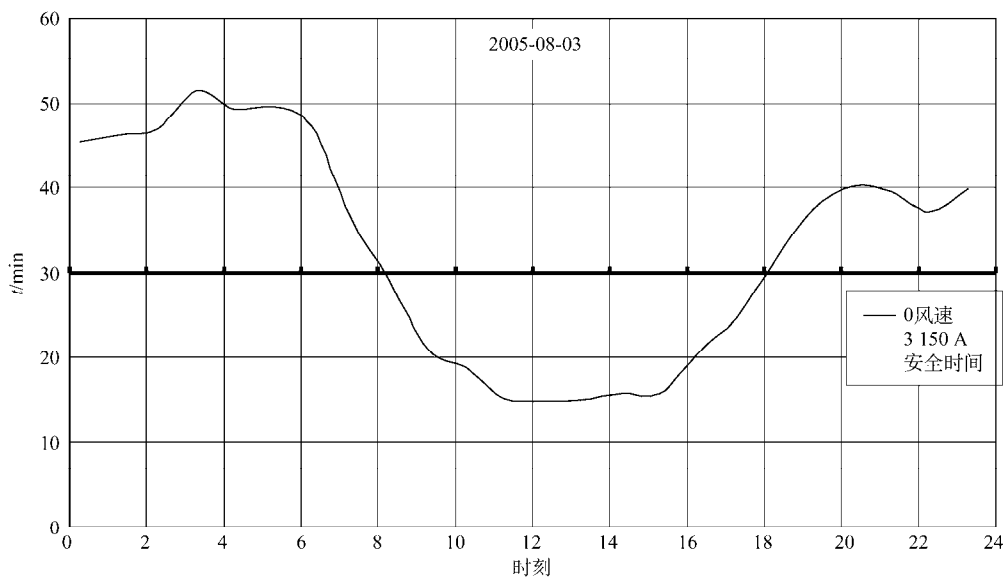
这里有一个典型(极端)的安全时间:气象条件为环境温度 40℃、太阳辐射强度为 1000 W/m²,风速为 0.5 m/s,双回线运行,电流

限额为 3150 A。在正常运行时,每条线路运行电流为 1575 A。出现“N-1”状况后,潮流发生 100%转移,运行电流突然增加至 3150 A,同时考虑气象条件发生劣化,风速降为 0,环境温度和太阳辐射强度不变,这时导线温度不突破 70℃温度限额的安全时间为 5.5 min。

2.1.3 方法 3: N-1 状况下导线温度实时跟踪模式

为了规避风险,确保线路运行的安全,在方法 1 和方法 2 中均将风速劣化至 0,因此,在“N-1”状况时,上述方法计算出的“安全时间下的安全电流限额”和“安全电流限额下的安全时间”都是偏保守的。

该方法可以帮助运行人员按实际情况进行操作。一旦发生“N-1”状况,系统就会按上述的方法 1 和方法 2 计算出发生“N-1”时的各种数据,系统就会自动进入“N-1 模式”。处于该模式时,系统会加快数据的采集频率,并实时显示在该环境下的导线温度上升的计算曲线和导线实际温度实时跟踪曲线。如图 4 所示,在正常工作时跟踪曲线一直在计算曲线下。如处于非正常情况下,跟踪曲线就会超过计算曲线,或者直接到达温度限额,这时运维人员就要及时改变现有的运行方式来确保线路运行处于安全状态。



注：最高温度为 35.5 °C，最高日照强度为 770 W/m²，最低风速为 0 m/s

图 3 3 150 A 安全时间

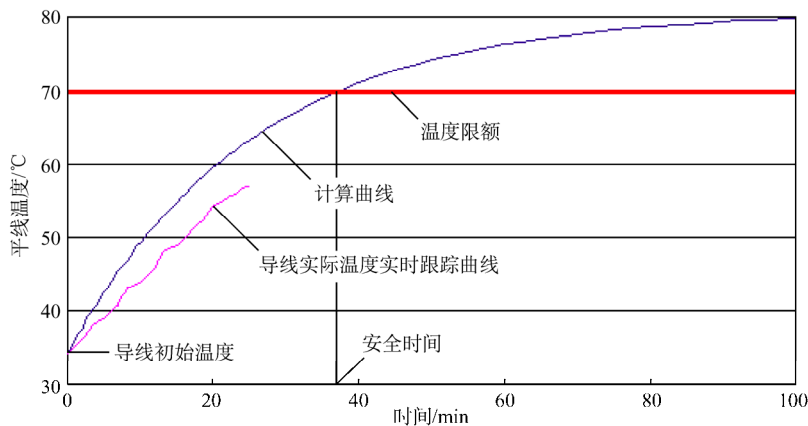


图 4 计算曲线和导线实际温度实时跟踪曲线

2.1.4 方法 4：气象条件预测限额模型

设置导线温度限额为 70 °C（或 80 °C），根据气象预报数据，确定并输入气象条件，该模型计算明天在该气象条件下，导线的电流限额。

气象条件可按如下方式确定和输入：环境温度按最高温度确定；日照强度按晴天、多云和阴天确定（系统自动确定数值）；风速按最小风级确定（系统自动确定数值）。该模型为运行部门确定明天的运行方式提供参考。

2.2 电缆

在对电缆的发热、温度控制和电缆供电能力等方面的设计中，主要依据是电缆载流量计算。电缆载流量计算的目的是确定在现场环境条件

下，既不影响电缆使用寿命，又能充分发挥电缆传输能力的电缆载流能力。实际应用中，电缆的外部环境千差万别、难以统一，而电缆载流量和外部环境的关系非常大，且电缆载流量是在设计阶段确定的，由于电缆传热环境的复杂性和不确定性，设计人员通常作最不利于散热的假设，以得到一个足够安全的电流值，在电缆寿命周期内调度部门都将使用该值。

所以，在处理各种复杂的外部环境以及电缆之间存在相互影响或需要对电缆进行增容时，不能简单照搬标准，应根据具体情况具体分析。

准动态增容的基本方法是：通过数据采集系统获取过去一段时间的电缆温度、负荷数据，根

据这些数据、采用稳态载流量计算标准建立电缆传热模型,并定期进行模型更新;然后根据当前电缆模型,推算未来一段时间的电缆载流量,实现电缆增容。

准动态增容与动态增容的区别在于:动态增容更新频率一般是几分钟,没有公认的标准,计算由软件自动完成,过程不透明。而准动态增容的更新周期最短可以为数天,采用稳态载流量计算方法、有国际通用标准,计算可以由软件自动完成,也可以人工干预完成,其过程是透明的。

在针对具体项目开展工作时,一般初期分别采用解析算法和国际专业电缆载流量计算软件 CYMCAP 来建立模型进行计算,并将两者计算结果进行比较验证。在得到精确模型后,根据电网负荷、环境等因素的变化使用 CYMCAP 软件开展准动态增容计算。

3 结束语

所提出的输电线路和设备的增容技术以及动态负荷实时控制系统,集局域电网内输电线路和变配电设备于一体,通过采集和分析变压器运行负荷、导线载流量、设备运行温度和设备周边的环境参数(环境温度、风速与日照强度)等实时数据,有机融合潮流计算分析仿真系统和远动系统的实时信息,将现有基于“设备”层面的状态监测技术与电网结构信息进行有机融合,建立输变电设备动态负荷智能管理系统,借助于电网潮流计算分析仿真系统,从“网络”层面准确辨识设备运行状态,实现设备过负荷能力实时分析与风险预警,为设备寿命评估管理与电网安全风险控制提供准确的数据支持,并为局域电网运行方式优化及继电保护、安全自动装置定值验证提供实时建议,最终服务于建设坚强的智能电网。

参考文献

- [1] 张启平. 输电线路增容技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 叶鸿声, 龚大伟. 提高导线允许温度的可行性研究和工程实施[J]. 电力建设, 2004, 9 (10): 1-8.
- [3] 梁俭. 输电线路增容在线监测在电力系统中的应用[J]. 广东电力, 2005: 18 (8): 34-36.
- [4] DL/T5092—1997 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [5] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 电网技术, 2005, 29 (10): 31-32.
- [6] 戴沅, 聂耸, 程养春. 输电线路动态增容载流量计算模型综述[J]. 广东电力, 2012, 25 (11): 51-56.
- [7] 钱之银. 提高华东电网 500 kV 输电线路输电容量的研究[J]. 华东电力, 2003, 31 (6): 339-341.
- [8] Holbert K E, Heydt G T. Prospects for dynamic transmission circuit ratings[C]. In Proceedings IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Sydney, NSW, 2001: 205-208.
- [9] Adapa R, Douglass D A. Dynamic thermal ratings: monitors and calculation methods[C]. In Proceedings of the Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, Durban, South Africa, 2005: 163-167.
- [10] 毛先胤. 动态提高输电线路输送容量监测系统及其因更用分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [11] 陆万烈, 夏业勤. 变压器绕组温度测量的热模拟误差[J]. 变压器, 1999, 36 (10): 15-18.
- [12] Ribeiro A B L, Eira N F, Sousa J M, et al. Multipoint fiber-optic hot-spot sensing network integrated into high power transformer for continuous monitoring [J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8 (7): 1264-1267.
- [13] Lienhard J H. A heat transfer textbook [M]. Cambridge: Phlogiston Press, 2005.
- [14] 汤焱, 刘成远, 郝忠言, 等. 变压器绕组热点温升的计算与实验研究[J]. 变压器, 2001, 38 (2): 1-5.
- [15] 蒋跃强, 陆志浩. 提高 500 kV 变压器过负荷能力的研究[J]. 华东电力, 2004, 32 (1): 14-17.

作者简介

韩建军 (1963-), 男, 教授级高工, 主要研究方向为电厂化学。

(收稿日期: 2015-12-10) EA

(编辑: 崔岩)