

文章编号:1672-3961(2008)06-0025-05

电力系统的超前热定值及其应用探讨

张辉^{1,2}, 王孟夏¹, 韩学山¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 济南供电公司, 山东 济南 250012)

摘要:通过设定保守环境条件而确定的输电线路允许载流量在大部分时间内限制了线路热载荷能力的发挥.从实时运行角度出发,以反映电热耦合关系的热平衡方程为基础,对线路热载荷能力进行重新审视,并给出静态热定值和暂态热定值的定义,在此基础上以温度决定导体热载荷能力为核心,温度与电力系统运行调度相牵连为线索,提出超前热定值的新概念,并以超前调度、安全调度为例,阐述超前热定值的应用前景,为深层次地研究电力系统运行调度中电热协调理论奠定基础.

关键词:电力系统;输电线路;超前热定值

中图分类号:TM726 **文献标志码:**A

The advanced thermal rating of power system and its application

ZHANG Hui^{1,2}, WANG Meng-xia¹, HAN Xue-shan¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Jinan Power Supply Company, Shandong, Jinan 250012, China)

Abstract: Current-carrying capacity of transmission lines obtained by setting conservative weather conditions limits the exertion of line heat capacity most of the time. Based on the heat balance equation that reflects the coordination relationship between heat and electricity, the heat capacity of transmission lines was reevaluated from the angle of real-time operation, and the definitions of static thermal rating and dynamic thermal rating were presented. From the standpoint that heat capacity is determined by the conductor temperature and the research clue that the temperature and power system operation dispatch are interlinked, a new concept of advanced thermal rating was proposed and its application foreground was expatiated by examples of advanced dispatch and security dispatch. The research can provide a foundation for the in-depth research of electro-thermal coordination in dispatch operation of power systems.

Key words: power system; transmission line; advanced thermal rating

0 引言

电流流经输电元件(以下简称导体)会引起导体温度的升高,同时引起导体弧垂和应力的增大,这些来自导体本身的机械和物理的限制都可以转化为导体温度的限制.而对于导体而言,其温度是由通过导体的电流、光照、对流散热和辐射散热的共同作用而决定的.一直以来,最大允许载流量是在保守的环境

参数(低风速、高光照等)假设下依照最大允许温度而确定的导体最大允许载流值,在实际运行环境中,这一定义限制了导体实际热载荷能力的发挥.20 世纪 70 年代, Davis 等人提出了在实时运行环境条件(日照、风速和温度等)量测下,确定导体的最大允许载流值的思想^[1-2],由此实现了集环境量测与数据采集与监视控制系统于一体的实时热载荷能力分析系统.这一工作在 20 世纪 80 年代先后被美国电力研究院多次资助进行了研究,并在 90 年代进行多个工

收稿日期:2008-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50677036)

作者简介:张辉(1984-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制.

E-mail: zhanghui84@163.com

程实践^[3],我国的华东电网对此也进行了研究和实践^[4-5].在上述导体热定值技术发展背景下,从电力系统运行环境角度出发,由导体载流的热平衡方程,依据导体载流与其温度间的同步或不同步关系,给出导体载流的静态和暂态热定值定义.在此基础上,结合电力系统运行调度与控制决策思想,提出超前热定值的概念,并就该概念如何融入电力系统运行与控制决策之中,以及应用的意义和前景给予分析和评述,以期使电力系统运行调度与控制的决策更加灵活化.

1 导体热平衡

当导体流经载流时,导体温度受到导体自身产生的热量,从外界吸收的热量与向外界散失的热量的共同作用.假设输电线路为均匀导体,其热平衡方程^[6-7]可描述为:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [q_l + q_s - q_c - q_r], \tag{1}$$

式中,

$$q_l = I_{ac}^2 \cdot R(T_c);$$
$$q_s = \alpha_s Q_s \sin(\eta) D;$$
$$q_c = \pi \lambda_f (T_c - T_a) Nu;$$
$$q_r = \pi D \epsilon \sigma_B [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4];$$

其中, q_l 为导体通过电流自身产生的热量, I_{ac} 为导体的载流(A), 导体电阻 $R(\Omega)$ 是导体自身温度 $T_c(^{\circ}\text{C})$ 的函数; q_s 为因日照作用而产生的热量, 其与光照吸收率 α_s 、光照强度 $Q_s(\text{W}/\text{m}^2)$ 、阳光有效入射角度 η 以及导体的直径 $D(\text{m})$ 有关; q_c 为导体对流散热的热量, 其与环境温度 $T_a(^{\circ}\text{C})$ 、导体温度 T_c 、热导率 $\lambda_f(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$ 和努塞尔数 Nu 有关, 努塞尔数与风速、风向等环境因素有关; q_r 表示导体辐射的散热量, 其与导体直径 D 、辐射吸收率 ϵ 、环境温度 T_a 和斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $\sigma_B(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ 有关; $m(\text{kg})$ 为单位长度导体的质量, $C_p(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$ 为导体的比热容.

由式(1)可见,导体温度高低是由导体载流、环境温度、风向、风速和光照等因素共同决定的.由式(1)还可见,导体载流变化必然引起导体温度的变化,相对温度变化过程而言,导体载流变化可看成是无时滞的,由此当导体温度不发生变化时,对应的热平衡方程,为静态热平衡,也表征此时导体载流与温度取得同步.反之在导体温度发生变化过程中,导体载流与温度是不同步的,此时为动态热平衡.而真正体现导体载流能力的是温度,可见,如何处理这一不

同步现象至少是挖掘导体潜在载流能力的一条线索,这也正是研究和探讨的核心所在.

2 热定值技术演变与发展

2.1 静态热定值

根据以上所述,所谓静态热定值就是指导体载流与其温度同步时,导体最大允许温度所对应的载流值.这也是在电力工程界人们对导体载流热定值起初的基本认识和工程实施的依据.

静态热定值可离线整定,也可在线整定.前者是环境条件固定情况下人们的做法,即传统的最大允许载流量,后者就是在实时量测基础上的做法,是实时热定值技术实现功能的一种.

静态热定值人们已经很熟悉,实质上就目前来看,至少国内外绝大多数电网的输电元件都或多或少的采用这一概念来确定其热定值.静态热定值的优点在于其一段时间内(长则一个季度,短则几小时)的不变性,又由于导体载流定值与温度的一致性,因而在电力系统运行调度、控制的决策中可直接使用,免去对导体温度的考虑,其缺点就是忽略导体载流与温度不同步的过渡过程,尽管这一过渡过程时间不长,但往往就是这一不长的时间过程的忽略,就会造成成本不该发生的连锁故障,产生不该有的经济损失.

2.2 暂态热定值

所谓暂态热定值是从动态热平衡方程(式(1))出发,考虑导体载流变化与温度变化间的不同步性,体现导体温度在不同持续时间的界定,即以温度来表征导体的热定值.之所以称之为暂态,是因为其体现的是温度变动的暂态过程,该过程结束,又回到静态热定值,所以该概念往往都对应着一个延续的时间.

图1是LGJ-400/35型导体在电流变化时导体温度的变化轨迹,其中相关环境参数:环境温度为 40°C ,风速为 0.5 m/s ,风向垂直导体,光照强度为 $1\,000\text{ W}/\text{m}^2$.导体的光照吸收率和辐射率均为 0.9 .假设在这一较短的时间内环境量不发生改变,导体初始处于静态热平衡状态.

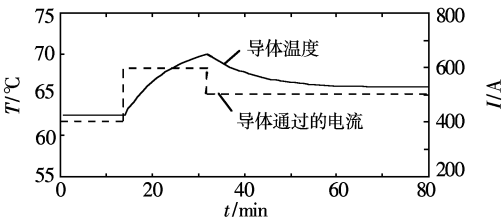


图1 导体的热动态过程
Fig.1 Dynamic thermal process of conductor

从仿真中可以求得此时的静态热定值为 577 A,假设当导体载流从 400 A 突变到 600 A 时,导体持续 17 min 才达到最高允许温度.可见在这 17 min 内,温度就是热定值,只要没有超过最高允许温度,导体的载流多大与静态热定值已没有关系,可见此时应该采用温度定值.

温度的变化过程与前期导体的温度,以及之后的运行时间相关,导体短时的热载荷能力即是在温度的变化中体现出来的,载流或环境参数变化越剧烈,导体的热惯性过程越明显.

将载流的限制转变为温度约束,可以更精确的对导体载流能力进行实质性的定值,由此也显现温度应该是电力系统分析中的一个状态,因为温度才是限制导体热载荷能力的根本约束.

暂态热定值反映的是一个在延续时间(Δt)的一个温度变化量,有机体现载流与温度间的不同步特点,载流变化在前,温度变化在后,即温度变化的滞后性.

3 超前热定值

静态热定值可通过将环境条件真实化来显现导体的载荷能力.暂态热定值使导体载荷能力更符合实际.然而,在实时环境下,尽管静态热定值和暂态热定值对提高导体载荷能力都有极好的作用,但它们仅仅把握了电力系统中导体个体的行为,与电力系统整体的运行调度、控制策略没有直接牵连,即目前热定值技术还无法左右导体载流的大小,监视、监控导体载流行为是其主要功能.因此,在目前热定值技术的基础上,进一步与电力系统潮流变化的规律相配合,将在电力系统调度层面上显示出热定值技术的高效作用.

暂态热定值给出了一定时间内导体允许载流能力的定值,尤其对电力系统运行发生输电紧张局面时能够起到缓解作用.勿容质疑,若有预见性的在电力系统调度、控制决策中考虑到这一点,这对电力系统运行的安全、可靠、经济水平的提高将是更有利的,这就是提出超前热定值的基本目的.

输电元件载流变化所引起热惯性过程的允许温升时间与输电元件载流变化大小、天气参数、输电元件本身初始温度等因素有关.而输电元件的载流可以由电力系统通过发电方式的改变、FACTS 控制策略的实施等调度方式加以控制,这样输电元件本身的初始温度或允许温升时间就成为可决策的量,进而输电元件载流的热动态过程就自然成为电力系统

运行调度、控制决策中不可分割的一部分.在这种情况下,电力系统运行调度、控制决策量的变化(如发电方式的改变,网络结构的改变,负荷变化等)就直接与输电元件热过程融合于一体,体现了更广义的电力系统运行状态下的实时热载荷能力分析系统.

由此,所谓超前热定值就是将电力系统运行的物理规律(潮流等)、输电元件的温度及其允许温升时间紧密结合,有预见性地将静态热定值和暂态热定值有机配合,以温度作为输电元件载荷能力的制约条件,从而得到满足一定目标下关于现时刻的一个调度决策结果.

超前热定值与静态热定值和暂态热定值在概念上有本质的区别,也有其抽象性,其反映的是一种与调度、控制决策关联的思想.具体表现在输电元件的初始温度和允许温升时间都可以随着电力系统运行调度策略的改变而改变;这种改变是有预见性、超前的改变;更重要的是超前热定值是在整个电力系统状态可观测条件下的一种实时调度,静态热定值和暂态热定值系统是这一调度的重要依据和基础.

可见,超前热定值是电力系统运行调度理论的扩展.若忽略输电元件的电磁过程,则考虑超前热定值的调度就是在未来一定时段内,按给定预想运行模式下,将传统优化调度与所有输电元件热动态过程紧密配合的控制问题,如何将静态热定值和暂态热定值概念与电力系统运行调度、控制决策有机结合,是一个具有实用性和理论性的崭新课题.

为使超前热定值能得到更深入的研究和应用,分析其能够有效发挥作用的场景是非常必要的,因此后文将举例说明超前热定值的应用场合.

4 超前热定值应用

4.1 超前调度

图 2 所示系统,发电机 G_1 承担主要发电任务, G_2 作为备用, G_2 费用相比 G_1 要高, G_1 最大有功功率为 288 MW, G_2 最大有功功率为 96 MW.系统双回线路的主要参数及所处环境参数:线路长度为 100 km,电压等级为 220 KV,25 ℃ 导体电阻为 $7.75 \cdot 10^{-2} \Omega/\text{km}$,电阻温度系数为 ℃,导体比热容为 $1074 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,环境温度为 40 ℃,风向垂直导体,风速为 0.5 m/s,光照强度为 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$,光照吸收率和辐射率均为 0.5,导体直径为 0.026 82 m.

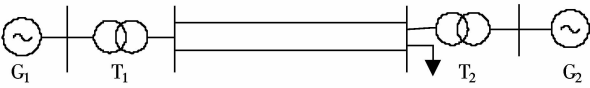


图 2 简单电力系统
Fig.2 Simple power system

图 2 所示系统,由于一条线路的检修使得系统依靠单条输电线路进行供电,系统在 55 min 内的负荷曲线见图 3 中实线所示,为分析方便,假定负荷变化时无功负荷为 50 MVAR 不变。

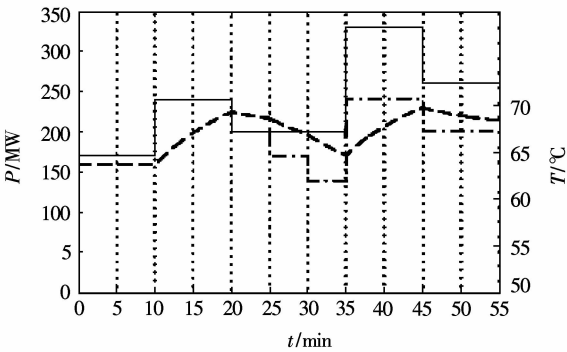


图 3 超前调度应用
Fig.3 Application of the advanced dispatch

计算可知,在当前环境状态下线路的静态热定值为 219 MW,可以看出在传统的调度方式下,在 10~20 min 内负荷为 240 MW 时需要机组 2 发电;而在 35~45 min 内,负荷水平为 330 MW,依靠线路输送 219 MW 与机组 2 满发 96 MW 尚不能满足负荷需求,切负荷不可避免。

若基于超前热定值,在 10~20 min 内线路可载 240 MW,线路温度仍然没有超出 70 °C,避免了机组 2 的发电。在 20~35 min,如果机组 1 仍然承担全部负荷,那么其在第 35 min 时的温度为 67.89 °C (577.573 A),在 35~45 min 时间内其最多只能承担 228.5 MW 的负荷,切负荷仍不可避免。观察发现在 20~35 min 内,为了满足将来负荷需求,机组 2 增发功率需要时间,同时线路在渡越峰荷时需要有较低的初温,所以在此之前就要提前决策,在 25~30 min 机组 2 出力 30 MW,在 30~35 min 机组 2 出力 60 MW,机组 1 出力依照图 3 虚线,这样的调度方案下导体温度的变化轨迹为图中虚曲线。在整个过程中,导体的温度仍在 70 °C 以内。

导体热惯性过程能够提供短时较大的载荷能力,然而这一能力的使用与导体的初始温度和运行时间都有关系。在系统检修或故障情况下,往往引起系统输送能力的不足。超前调度即是在未来时段负荷预知的情况下通过超前的控制、决策来优化利用超前热定值,达到避免或减少切负荷的作用,赢得系统控制的经济性和安全性。超前调度实质上是以温

度作为导体载荷限制约束的经济调度问题,在超前调度中,导体的温度、运行时间和载荷水平都是可以用来决策的量,而且温度在这一过程中是连续、关联的(本例第 35 min 之前所作的调整,就是超前的控制,而这一控制手段又与前期的负荷水平、控制策略和调整策略都有关系)。

4.2 安全调度

同样对于上述的系统,机组 1 通过双回线供电,在安全经济调度的要求下,对应此简单系统,要求在发生单条线断线事故后另一条线路不过载,在传统的调度方式下单条线路的载荷能力为 219 MW,即 N-1 安全约束下(单发电计划),每条线路只能承担载荷能力一半的功率输送才能保证在断线故障下线路不越限。即系统在进行调度决策时考虑了预想事故的影响并做出调整,使得能够在故障发生时保证系统安全。然而这一安全约束的加入使得系统调度的经济性有所降低,如前面所述问题,输电线路由于针对 N-1 的调度,只能输送其一半的功率,同时注意到这些安全约束影响着系统每一时刻的调度决策。

预想事故的发生引起了潮流的转移,单发电计划考虑了预想事故发生对系统引起的冲击,但没有考虑事故发生后系统的调整能力以及线路的短时过载能力。同时,尽管多发电计划考虑了事故后系统的调整能力,但只是粗略的考虑了预想事故下的调整时间(如设定 5 min 过载定值和 20 min 过载定值),而在超前热定值中线路的允许过载时间是确定的,可以使调度结果更加合理。

就本例而言,如果发电机 2 在 10 min 可增发出力 50 MW,由计算表明机组 1 在正常情况下可以提供 269 MW 的功率。在预想事故发生的情况下,单条线路可以在 10 min 内承担 269 MW 的负荷且温度在 70 °C 以内,第 10 min 后发电机 2 承担出力 50 MW,这就是超前热定值下的调整策略。超前热定值在此的应用扩展了调度域,增进了调度决策的经济性。

在安全经济调度中,对预想事故的考虑使得调度的决策要由经济性向安全性做出一定的调整,目的是在事故发生时线路和机组有较好的备用容量来应对。由于事故发生时系统的线路和机组都有一定的调整能力,因此对于备用的准备应该考虑事故后系统的这种调整能力,超前分析各类预想事件下的载流变化规律,从而做出更加恰当的决策,这便是考虑预想事件约束的超前调度问题。对于实际电网来讲,热载荷能力限制一般不会影响正常载流的调度,但是故障下其限制作用将变得突出,这影响着考虑安全性的调度决策,超前热定值中对这种限制的描

述更加精确,其调度决策能够更准确地协调经济和安全的关系.

5 结束语

传统电力系统运行调度中,决策量往往都转化为统一的电气量进行处理,这样就缩小了调度可决策的空间,低估了部分资源利用的效能,在环保压力和资源紧缺背景下应该重新审视这一问题.

超前热定值概念,进一步将热定值的概念广义化,使电力系统运行调度决策的空间灵活化,这一概念的意义和作用将使电力系统运行调度理论发生变化,应该进行深入研究和探索.通过控制输电元件载流能力的变化规律,把握潮流走向,更有前瞻性的调度电力系统的运行,发挥电网潜在的作用,由此也表明探讨有着非常积极的现实意义,深层次的理论研究正在开展之中.

参考文献:

[1] DAVIS M W. A new thermal rating approach: the real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines, Part I[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, PAS-96(3):803-809.

[2] DAVIS M W. A new thermal rating approach: the real time

thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines, Part II[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, PAS-96(3):810-825.

[3] DOUGLASS D A, Edris A A. Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3):1407-1417.

[4] 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.2005,33(7):1-4.

ZHANG Qi-ping, QIAN Zhi-yin. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 33(7):1-4.

[5] 杨鹏,房鑫炎.采用 DTCR 模型提高输电线输送容量[J].华东电力,2005(3):11-14.

YANG Peng, FANG Xin-yan. DTCR model and its realization [J]. East China Electric Power, 2005, (3):11-14.

[6] IEEE Transmission and Distribution Committee. IEEE Standard 738-1993, IEEE Standard for Calculation of Bare Overhead Conductor Temperatures[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.

[7] 张辉,韩学山,王艳玲.架空输电线路运行载流量分析[J].电网技术,2008,32(14):31-35.

ZHANG Hui, HAN Xue-shan, WANG Yan-ling. Analysis on current carrying capacity of overhead lines being operated[J]. Power System Technology, 2008, 32(14):31-35.

(编辑:陈燕)