

电热协调潮流及输电线路温度的变化过程分析

丁希亮¹, 韩学山¹, 张辉¹, 王艳玲², 常康¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061; 2. 威海职业学院机电系, 山东省威海市 264200)

Analysis on Electrothermal Coordination Power Flow and Transmission Line Temperature Variation Process

DING Xi-liang¹, HAN Xue-shan¹, ZHANG Hui¹, WANG Yan-ling², CHANG Kang¹

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

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Weihai Vocational College, Weihai 264200, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Based on the implementation of dynamic thermal rating and the concept of electrothermal coordination, the determination of transmission lines heating and related thermal ratings in different technique conditions are discussed, and the models and modeling algorithms of transmission line temperature variation process are studied deeply aiming at the grid limited by line temperature. Through electrothermal coordination power flow, namely solve the algebraic equation and differential equation alternately, the temperature dynamics of transmission lines (critical transmission lines especially) adapting each fluctuation of power system operation scheme is analyzed, consequently whether the transmitting capacity is restricted can be differentiated directly by the real-time temperature of the lines, the potential transmitting capacity will be excavated, thus the security and economy of system operation are improved. The results lay the foundation for theoretical research of electric power system operation dispatching with electrothermal coordination.

KEY WORDS: electric power system; electrothermal coordination; heat balance equation; current capacity

摘要: 在动态热定值实施背景及电热协调的概念基础上, 探讨了输电线路发热及相关热载流极限在各种技术条件下的确定问题。针对存在输电能力受热限制的电网, 深入研究了电热协调潮流及输电线路温度变化过程模型和算法的基础问题。通过电热协调潮流, 即代数方程和微分方程的交替解算, 给出适应电力系统运行模式各类扰动下的输电线路(尤其是关键输电线路)的温升变化过程的轨迹, 从而期望达到实时通过输电线路的温度变化来判别输电线路载送能力是否受制约, 充分挖掘现有电网潜在的输电能力, 以提高系

统运行的安全性和经济性, 为进一步开展计及电热协调的电力系统运行调度理论研究铺设基础。

关键词: 电力系统; 电热协调; 热平衡方程式; 载流量

0 引言

架空输电线路的传输容量是指输送功率的大小以及距离的远近, 它与电力系统运行的经济性、稳定性有密切关系。文献[1]给出运行环境下限制输电线路输送能力的主要因素, 并给出由这些因素决定的输电线路输送能力曲线, 表明短距离输电线路的输送能力主要受热的限制。受热限制的短距离输电线路的输送能力通常由弧垂对地的安全净距决定, 与相关变电设备也有关系, 该限制可以转换为输电线路运行温度的表达。

工程上将输电线路输送能力对应的最高允许温度转换成允许的最大载流量。最大载流量确定是通过热平衡方程的求解来完成的, 即在环境参数设定的条件下, 使输电线路达到热平衡状态的载流量。该载流量又可称为静态热定值(static thermal rating, STR)。为使 STR 有广泛的适应性, STR 确定时必须使用保守的条件, 低估输电线路的输送能力在所难免。STR 无法反映输电线路载流量变化过程中, 输电线路实际温度变化的情况。

为克服 STR 的不足, 可以事先确定多个不同场景下的 STR, 如长期、短期、紧急情况下的 STR。进一步就是在线热定值, 也称为动态热定值(dynamic thermal rating, DTR)。

Davis 在 1977 年提出 DTR 概念和确定方法, 从而奠定此领域理论与工程实践的基础^[2-3], DTR 实现的基础是 SCADA 系统及其扩展, 即必须有实时的气

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677036)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677036).

象数据、输电线路的温度和载流等信息。此研究在上世纪 80 年代先后由美国 EPRI 多次资助，并于 90 年代进行了小规模工程实践^[4-6]。

20 世纪 80 年代电力工业改革的兴起，竞争电力市场的出现，再加之电源、用户与电网间发展的不均衡，环境保护要求等，使输电能力成为焦点问题^[7-13]。因新建或扩建输电线路走廊日益受各方面条件的限制，重新审视、改进和挖掘现有电网的输电能力引起各界的高度重视^[14-16]。动态热定值的目的是挖掘潜在的输电能力，由此可以看作提高输电能力的有效手段。

传统静态热定值保守，又不能反映输电线路所处环境发生变化时，对输电线路输送能力的影响。动态热定值虽考虑了环境的变化，但还是将输电线路的输送能力转化为载流量，难以考虑温升过程，对运行调度缺乏预见性。在此基础上，文献[17-18]提出了在电力系统运行调度过程中电热协调(electrothermal coordination, ETC)的概念和框架性探讨，并给出了各种情况下的案例分析。ETC 将输电线路的热惯性加以利用，有机协调输电线路温度与载流量间的关系，以温度变化过程显现输电能力，从而使输电能力得到进一步的挖掘。

在此背景下，本文对输电线路的发热过程、允许温度及允许载流量分析基础上，分析按输电线路载流量(STR 和 DTR)确定输电能力有其保守性或冒进性的原因。在 ETC 概念下，对电力系统运行状态求取的电热协调的动态模型、算法进行了深入细致的研究，为进一步在电力系统运行调度中，有预见性的挖掘潜在输电能力奠定基础。文中，在已具备各种量测假设条件下，以输电线路电阻变化为纽带，牵连输电线路温升的热平衡微分方程为核心，并与潮流交替，从而形成电热协调的电力系统潮流及输电线路温升过程求解的模型和算法，实时把握潮流与温度变化的关系，以达到在各种情况下由输电线路温度决定其输送能力的目的。

电热协调潮流及输电元件温度变化过程，是电力系统分析、优化调度及控制中的一个新的、应该考虑的问题，本文是其系列研究的基础。实施电热协调的优点在于实时把握输电元件，尤其是受热限制的关键输电元件温度的变化，从而动态的、有预见性的以允许温度来界定调度的决策空间，以尽可能利用现有电网资源使发电与用电的决策结果更加安全、可靠和经济。

1 输电线路发热及相关问题

1.1 输电线路的发热过程

假设输电线路为理想均匀材质，在未通过电流时，其温度与周围介质的温度相等。当有电流流过时，损耗产生的热量，一部分使输电线路自身温度上升，另一部分由于输电线路自身温度高于周围介质温度而散失到周围环境中去，在输电线路发热未达到稳态时，其温升过程的热平衡方程式可以表示为

$$mC_p \frac{dT_1}{dt} = I^2 R[T_1(t)] + q_s(t) - q_c[T_1(t)] - q_r[T_1(t)] \quad (1)$$

式中： t 为时间， s ； m 为单位输电线路的质量， kg/m ； C_p 为输电线路材料的比热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ； T_1 为输电线路的运行温度， $^\circ C$ ； I 为流过输电线路的电流， A ； $R(T_1)$ 为在温度为 T_1 时单位长度输电线路的电阻， Ω/m ； q_s 为单位长度输电线路吸收太阳日照的热量， W/m ； q_c 为单位长度输电线路的对流散热量， W/m ； q_r 为单位长度输电线路的辐射散热量， W/m 。

式(1)反映了通过输电线路的电流发生变化时，输电线路的温升过程。电流是引起输电线路温升的主要原因(其它如电晕、磁滞、涡流损耗暂不考虑，或忽略)，其作用表现在电阻上产生损耗，而对流和辐射会缓解温升，起到冷却的作用。在一定的环境条件下，上述因素可以近似表达为

$$R[T_1(t)] = R_{ref} [1 + \alpha_1(T_1(t) - T_{aref})] \quad (2)$$

$$q_c[T_1(t)] = A_c [T_1(t) - T_a(t)] \quad (3)$$

$$q_r(T_1(t)) = A_r [(273 + T_1(t))^4 - (273 + T_a(t))^4] \quad (4)$$

$$q_s = E_t A_t D \quad (5)$$

式中： R_{ref} 为输电线路制造商规定的额定环境温度(T_{aref})下的交流电阻； α_1 为输电线路材料的电阻温度系数； $T_a(t)$ 为输电线路周围实际环境的温度。 A_c 和 A_r 分别为对流换热系数和辐射换热系数，它们受输电线路材料、几何特性及周围环境因素的影响，如风速、环境温度、材料的辐射系数、散热表面积等； E_t 为太阳辐射功率密度(我国一般取 $1000 W/m^2$)； A_t 为输电线路的吸收率； D 为输电线路的直径。

为方便起见，上述环境因素变化对相应参数变化的影响，以及对载流量影响暂不考虑，认为它们为常数。

由式(2)可见，输电线路在实际运行中，其自身温度与厂商指定额定环境温度有偏差时，其等效电阻是变化的，偏差越大，电阻的变化幅度就越大。另一方面，由式(3)、(4)可见，对流和辐射换热的效

果取决于输电线路自身温度与周围环境温度的偏差,偏差越大其效果就越好。由此,实际电力系统运行时,即使环境温度不变,由于各输电线路载流变化及变化速率的不同,输电线路温升的变化是不均衡的。

1.2 输电线路发热允许载流量的确定

在任意初始条件下,当输电线路的温度不再发生变化时,就达到了平衡状态,当某一平衡载流量刚好对应输电线路发热的允许温度,此载流量就是输电线路允许的载流量^[19-21],这时式(1)即:

$$q_s(\infty) + I_{\max}^2 \cdot R(T_{1\max}) = q_c(T_{1\max}) + q_r(T_{1\max}) \quad (6)$$

由此,输电线路发热允许的载流量又可以表示为:

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{q_c(T_{1\max}) + q_r(T_{1\max}) - q_s(\infty)}{R(T_{1\max})}} \quad (7)$$

现行技术规程规定的输电线路载流量是设定在保守的气象条件下(如较高的环境温度、较强的日照、较低的风速等同时出现),取 $T_{1\max}$ 为输电线路长期(或短时)发热的最高允许温度,由此式(7)计算出来的结果是保守的。并且从长期最大允许载流量的概念可以看出,最大载流量的确定是处于对单一输电线路的考虑,当然可以根据场景的不同设定,可以较方便确定出不同条件下允许的最大载流量。长期以来,实际电力系统运行调度中基本就是依据这一量来决策系统的运行。从电力系统运行调度的角度看,用单一输电线路最大载流量指导系统运行会造成两种情况:一种是通过输电线路的载流并未超过允许载流量,而实际上温度已越限,此时将影响系统的安全;另一种是输电线路温度并未达到允许的温度,通过输电线路的载流已超过了允许载流量而误认为过载,从而引起不必要的操作。

1.3 输电线路温度变化与潮流的关系

假设某一输电线路的首末节点表示为 j 和 k ,则该输电线路潮流可表示为(忽略对地电纳)

$$P_{jk} = U_j^2 g_{jk}(T_l) - U_j U_k [g_{jk}(T_l) \cos \theta_{jk} - b_{jk}(T_l) \sin \theta_{jk}] \quad (8)$$

$$Q_{jk} = U_j^2 b_{jk}(T_l) - U_j U_k [g_{jk}(T_l) \sin \theta_{jk} + b_{jk}(T_l) \cos \theta_{jk}] \quad (9)$$

流过该输电线路的电流为

$$I_{jk} = \sqrt{\frac{P_{jk}^2 + Q_{jk}^2}{U_j^2}} \quad (10)$$

式中: U_j 、 U_k 分别为的节点电压的幅值; g_{jk} 和 b_{jk} 分别为输电线路的电导和电纳; θ_{jk} 为节点 j 和 k 的节点

电压相角之差。

由式(2)可知, $g_{jk} = r_{jk} / (x_{jk}^2 + r_{jk}^2)$ (r_{jk} 和 x_{jk} 分别为电阻和电抗)和 $b_{jk} = -x_{jk} / (x_{jk}^2 + r_{jk}^2)$ 都与电阻成分有关,因而均随温度的变化而变化,从而潮流也是随温度的变化而变化。在潮流的某一状态下,因为电网中各输电线路的载流不同,进而各输电线路的温度也是不同的。因此,当某一扰动(负荷变化、发电方式变化、输电元件切除或投入)发生时,各输电线路的温升过程也就不同。由此,需要从整个系统的角度来统筹考察每条输电线路的温升过程,而不能将其孤立看待。由式(10)可知,通过输电线路的电流 I_{jk} 也随着温度在变化,而 I_{jk} 正是导致输电线路温度变化的根本原因,因此在分析输电线路的温升过程时,要与电力系统的潮流变化相协调。

2 潮流及温度变化过程模型及算法

2.1 电热协调的动态分析模型

电热协调的潮流及各输电元件温度变化过程就是将上述因素统筹考虑。若电力系统中给定 c 条关键输电线路(载流量较大,或重点监视的输电断面),可以将输电线路实际运行过程中,随着输电线路载流的变化,尤其是急剧波动的变化,所引起系统潮流的变化、输电线路温度的变化、电阻的变化有机一体的表达为

$$F[u(t), x(t), p(t)] = 0 \quad (11)$$

$$\frac{dT_i(t)}{dt} = g_i[t, T_i(t), I_i(t)], \quad i = 1, 2, \dots, c \quad (12)$$

式(11)表示 t 时刻潮流方程。其中: $u(t)$ 表示控制量,如机组有功、无功等; $x(t)$ 表示系统状态量,如电压模值、相角; $p(t)$ 表示相关参量,如元件电阻、电抗、负荷等。

式(12)表示任意关键输电线路的热平衡微分方程,来自式(1)的简写,其中显含时间 t ,输电线路温度 $T_i(t)$ 和输电线路载流 $I_i(t)$ 。

在忽略电力系统电磁变化过程的情况下,式(11)是任意瞬间 t 的电力系统潮流方程,研究对象是整个电力系统,从已知条件和求取结果,可以获取电力系统某一个时刻的运行状态。式(12)是计及任意瞬间潮流影响的关键输电线路集合的热平衡微分方程,研究对象是每条关键输电线路。由式(1)~(5)可知,式(12)是在已知系统任意瞬时刻的潮流状态(求取每条关键输电线路的载流)、天气等环境因素基础上,求取关键输电线路任意时刻的运行温度。

2.2 算法及其处理

电热协调的核心算法是代数方程和微分方程的交替进行。对代数方程(潮流方程)采用成熟的牛顿法进行解算,对微分方程(式(12))采用 Runge-Kutta 单步法进行解算。

研究的初始状态为扰动前 $t=0$ 的时刻,电力系统的结构和参数、系统的运行状态已知,对 c 条关键输电线路,其初始温度 $T_0(c$ 维列向量),环境温度 $T_a(c$ 维列向量)均已知。

设 Δt 为时间步长,扰动发生前后瞬间温度不突变,而忽略电磁暂态过程的潮流发生变化。

在 $t=t+\Delta t$ 时,求解潮流,继而按 $t=t+\Delta t$ 进行输电线路温度变化曲线的求解,依次反复进行,直至输电线路自身温度不再变化而结束计算。

输电线路的温度变化曲线的每一步计算过程如下:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= g_i[t, T_i(t), I_i(t + \Delta t)] \\
 k_2 &= g_i[t + \frac{h}{2}, T_i(t) + \frac{h}{2}k_1, I_i(t + \Delta t)] \\
 k_3 &= g_i[t + \frac{h}{2}, T_i(t) + \frac{h}{2}k_2, I_i(t + \Delta t)] \\
 k_4 &= g_i[t + h, T_i(t) + hk_3, I_i(t + \Delta t)] \\
 T_i(t + h) &= T_i(t) + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\
 i &= 1, 2, \dots, c
 \end{aligned}$$

式中 h 为 Runge-Kutta 单步法迭代时的步长,每个微分方程的迭代次数为 $n=\Delta t/h$,通过迭代求解 c 个微分方程,可以得到 $t=t+\Delta t$ 时 c 条关键输电线路的温度。由式(2)知,输电线路温度的变化会引起输电线路电阻的变化,这时需要用新的温度来修正输电线路电阻。

具体的求解流程如图 1 所示(图中 ϵ 是判断温度达到平衡状态的精度),其中

$$\Delta T = T(t + \Delta t) - T(t) \tag{13}$$

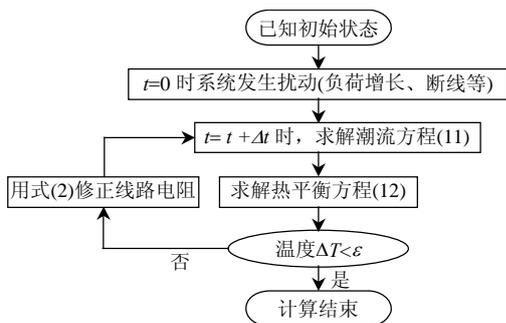


图 1 程序流程图

Fig. 1 Flow process diagram of program

在实际系统条件具备的情况下,可以实时进行上述计算,也可以通过状态估计代替潮流计算。由于对每一输电元件进行计算,计算耗时就会增加,因此寻求关键输电元件就显得很重要。

另外,对某一时刻预想事故的后果分析,如发电机组的投入与退出,输电线路的切除与投运,都可以通过上述关键集输电元件的温度变化过程进行分析。

3 算例及其分析

本文用一个简单的三节点电力系统作为算例对阐述的模型和算法进行了分析。线路电压等级为 110 kV,标幺值表示的系统如图 2 所示。相关输电线路的参数如表 1 和表 2 所示,其中 G3 为快速备用机组。从潮流分析可以发现,输电线路①并不关键,为了比较这里也对其进行了分析计算。

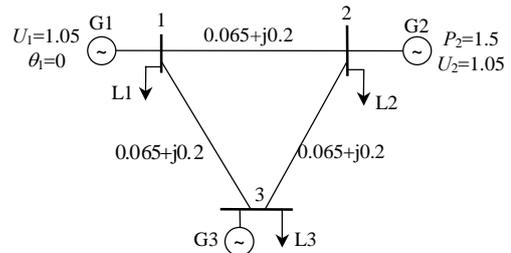


图 2 简单电力系统

Fig. 2 Simple system

表 1 线路的热系数

Tab. 1 Line thermal behavior coefficient

$mC_p/(J/m \cdot ^\circ C)$	$q_s/(W/m)$	$A_c/(W/m \cdot ^\circ C)$	$A_r/(W/m \cdot ^\circ C)$	$\alpha_l/(\Omega/^\circ C)$
852.72	19.152	1.0954	3.4×10^{-9}	3.86×10^{-3}

表 2 线路初始状态

Tab. 2 Line initial condition data

线路名称	对应节点	$T_a(t)/^\circ C$
①	1—2	25
②	1—3	25
③	2—3	25

图 2 中输电线路的电阻参数为 R_{ref} 。3 条输电线路材质一样,型号都为 LGJ-240, mC_p 为常数,并假设 A_c 、 A_r 和 q_s 等也都为常数,数据见表 1。另外假设这 3 条输电线路的输电能力均受热的限制,即电压、静稳不构成对其能力的限制,此现象在地区电网多见。

通过式(7),并结合式(2)~(5),可以计算出这 3 条输电线路的长期允许载流量或称最大安培电流,为 574.67 A。计算时,取 $T_{lmax}=70^\circ C$, $T_a=25^\circ C$, mC_p 、 A_c 、 A_r 和 q_s 取表 1 中的数据。各条输电线路名称及

所处环境温度数据如表2所示。

给定系统在初始状态下,两种情况下的分析结果如下所示。

(1) 负荷突然扰动。

初始条件下各节点负荷如表3所示,当 $t=15\text{ min}$, 节点3的有功负荷突然上升至1.9, 无功假设不发生变化, 并且一直持续到 $t=45\text{ min}$, 如图3所示。在不考虑其它环境因素(如风速、日照等)的变化下, 由于环境温度取 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 此时动态热定值和静态定值相同且均为 574.67 A 。按常规分析, 当节点3负荷达到1.9时, 线路②的载流量已超过 574.67 A , 也即输电线路的载流量已超出最大安培电流, 此时应采取措施。然而, 通过分析三条输电线路的温升过程就会发现, 由于热惯性的存在, 输电线路温度其实并没有超过 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。图4所示为3条输电线路的温升过程。图5为节点3的电压变化轨迹。

上述按图3模式的负荷变化, 在现实中是存在的, 经过 150 min 的分析, 可以确定每一输电线路自身温度的变化轨迹(如图4), 由此评判输电能力

表3 负荷数据
Tab. 3 Load data pu

时间	P_1+jQ_1	P_2+jQ_2	P_3+jQ_3
$t=0^-$	$0.9+j0.55$	$0.8+j0.6$	$1.6-j0.75$

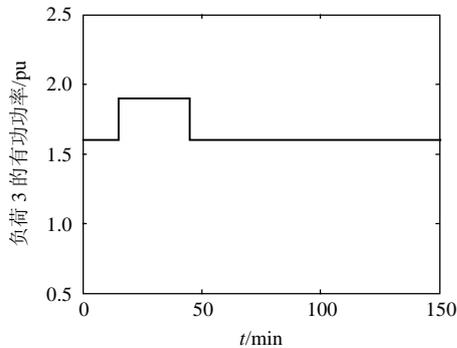


图3 节点3负荷的有功变化

Fig. 3 Load active power curves of node 3

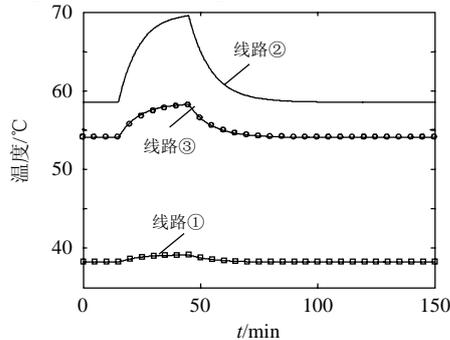


图4 输电线路温度变化曲线

Fig. 4 Transmission line temperature curves

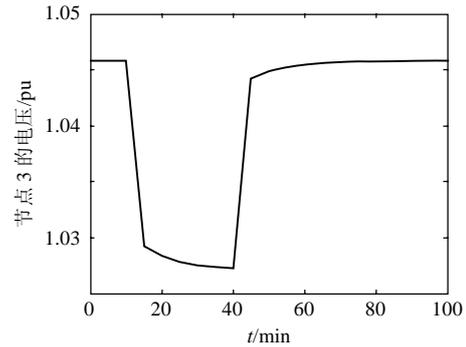


图5 节点3的电压有效值变化曲线
Fig. 5 Voltage curves of node 3

由载流量转为温度, 只要温度没有超越允许温度, 理论上讲就是安全的。尽管这种情况不会持久发生, 但不该切除的设备一旦切除, 级联性、波及性故障就可能会发生, 同样, 未切除本该切除的设备, 后果也是难以想象的。

图5显示的是随输电线路温度的变化, 输电元件的电阻也必然发生变化时, 节点3电压受电阻影响的变化过程。相对来讲, 在正常情况下, 由于电阻本身数值不大, 由此引起节点电压的变化并不是显著的, 根据这一特点, 在工程上建立电热协调的优化潮流时, 可对代数方程的求解进行简化, 以免其复杂性。

(2) 线路开断。

如图3所示, 假设初始情况下各节点负荷如表4所示。若在 $t=10\text{ min}$ 时线路③被开断, 通过分析, 可得此时线路①、②的温升过程如图6所示, 从温升过程可见, 如果节点3的快速备用机组能在 $t=30\text{ min}$ 之前投入运行或线路③排除故障重新恢复运行, 即可避免切负荷或故障的发生。

此情形对考虑预想事故下的调度有非常重要

表4 负荷数据
Tab. 4 Load data

时间	P_1+jQ_1	P_2+jQ_2	P_3+jQ_3
$t=0^-$	$0.9+j0.55$	$0.8+j0.6$	$1.1-j0.4$

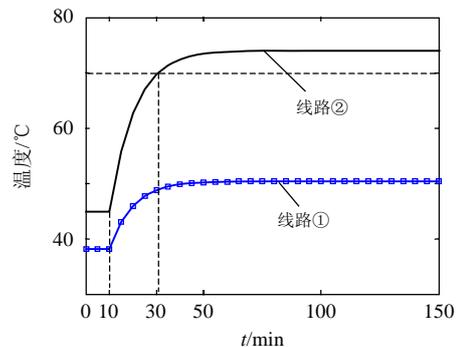


图6 输电线路温度变化曲线

Fig. 6 Transmission line temperature curves

的意义。因为决定输电线路输送能力的根本因素是机械强度, 机械强度可以转化为热强度来表征, 二者有其一致性。因此, 电热协调转而追踪输电元件温度变化的轨迹, 对电力系统运行的优化调度与控制又有着新的启示。

将电热协调引入电力系统的运行与控制决策中, 对检修、机组组合、动态经济调度、预防性控制等都有积极的作用, 当然对决策方法也带来新的问题。

4 结论

本文就电热协调潮流及输电元件温度变化的建模和分析方法进行了基础性研究。研究表明在 DTR 基础上实施电热协调可以更充分地挖掘电力系统潜在的输电能力, 增强系统在扰动状态下抵御事故的能力。同时, 由于环境、地域、经济等各方面条件的制约, 急切要求现有输电能力能得到最充分的使用和挖掘。将关键的输电元件的电气特性和热动态特性有机统一地进行考虑, 从而实现以变化的温度确定输电能力, 这对实际输电能力的决策与评判非常有意义。

另外, 在 DTR 基础上实施电热协调, 可以有预见性或超前性的对电力系统运行方式做出更合理的决策, 本文是电热协调优化决策的基础。

参考文献

- [1] Dunlop R D, Gutman R, Marchenko P P. Analytical development of loadability characteristics for EHV and UHV transmission line[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS98(2): 606-613.
- [2] Davis M W. A new thermal rating approach: The real-time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1978, 96(3): 803-809.
- [3] Davis M W. A new thermal rating approach: The real-time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(3): 810-825.
- [4] Hall J F, Deb A K. Prediction of overhead line ampacity by stochastic and deterministic models[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(2): 789-800.
- [5] Douglass D A, Edris A A. Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(3): 1407-1417.
- [6] Douglass D A, Edris A A. Field studies of dynamic thermal rating methods for overhead lines[C]. Transmission and Distribution Conference, New Orleans, U.S.A., 1999, 2(7): 642-651.
- [7] 郭琦, 赵晋泉, 张伯明, 等. 一种线路极限传输容量的在线计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 1-5.
Guo Qi, Zhao Jinquan, Zhang Boming, et al. A method for on-line computation of total transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 1-5(in Chinese).
- [8] 周孝信, 郭剑波, 胡学浩, 等. 提高交流 500kV 线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 1-6.
Zhou Xiaoxin, Guo Jianbo, Hu Xuehao, et al. Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 1-6(in Chinese).
- [9] 黄海涛, 郑华, 张粒子. 基于改进粒子群算法的可用输电能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 45-49.
Huang Haitao, Zheng Hua, Zhang Lizi. Study of available transfer capability based on improved particle swarm optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 45-49(in Chinese).
- [10] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
Zhou Decai, Zhang Baohui, Yao Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38(in Chinese).
- [11] 张强, 韩学山, 张元鹏, 等. 静态安全约束下基于分解最优潮流的最大输电能力计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 26-31.
Zhang Qiang, Han Xueshan, Zhang Yuanpeng, et al. Optimal power flow decomposition based total transfer capability calculation under static security constraints[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 26-31(in Chinese).
- [12] 李国庆, 郑浩野. 一种考虑暂态稳定约束的可用输电能力计算的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 20-25.
Li Guoqing, Zheng Haoye. A novel algorithm for available transfer capability considering transient stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 20-25 (in Chinese).
- [13] 高亚静, 周明, 李庚银, 等. 基于马尔可夫链和故障枚举法的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 41-46.
Gao Yajing, Zhou Ming, Li Gengyin, et al. Available transfer capability calculation based on markov chain and enumeration method [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 41-46(in Chinese).
- [14] 帅军庆. 华东电网技术创新和发展展望[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T18-21.
Shuai Junqing. Prospect of technical innovation and development of East China Grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): T18-21(in Chinese).
- [15] 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(7): 1-4.
Zhang Qiping, Qian Zhiyin. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission Line[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 1-4(in Chinese).

- [16] 刘景安, 张杰. 电气设备温度在线监测系统[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 98-100.
Liu Jingan, Zhang Jie. On-line temperature monitor system of electrical appliance[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 98-100(in Chinese).
- [17] Banakar H, Alguacil N, Galiana F D. Electrothermal coordination Part I: Theory and implementation scheme[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(2): 798-805.
- [18] Alguacil N, Banakar H, Galiana F D. Electrothermal coordination Part II: case studies[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(2): 1738-1745.
- [19] IEEE Standard 738—1993. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors[S].
- [20] 叶鸿声. 高压输电线路导线载流量计算的探讨[J]. 电力建设, 2000, (12): 23-26.
Ye Hongsheng. Inquire into calculation of conductor current carrying ampacity on HV transmission line[J]. Electric Power Construction, 2000, (12): 23-26(in Chinese).
- [21] 熊信银, 发电厂电气部分(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.



丁希亮

收稿日期: 2007-12-11。

作者简介:

丁希亮(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制, dingxiliang@mail.sdu.edu.cn;

韩学山(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

张辉(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

王艳玲(1979—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

常康(1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

(编辑 郭联哲)