

基于输电线路有功功率损耗的软 DTR 实现

汝绪丽¹, 陈芳¹, 张健², 宋士瞻², 张辉³, 张强³

- (1. 济南大学自动化与电气工程学院, 济南 250022;
2. 国网山东省电力公司枣庄供电公司, 山东枣庄 277000;
3. 国网山东省电力公司, 济南 250001)

摘要: 通过直接估计输电线路电阻实现软动态热定值 (dynamic thermal rating, DTR) 功能, 存在难以精准把握的问题, 因而提出将输电线路的最高允许温度转化为有功功率损耗的限制, 从而确立输电线路短期热定值的方法。以输电线路热平衡方程中的环境参量作为状态变量, 根据输电线路有功功率损耗与电阻、温度的耦合关系, 推导出输电线路有功功率损耗变化的微分方程, 以此建立系统的量测方程; 同时, 考虑热平衡方程参数变化的迟缓性, 建立状态变量空间表达式; 继而依据输电线路有功功率损耗变化率, 采用卡尔曼滤波的方法, 实现对状态变量的估计。由此, 完成了输电线路软 DTR 的功能, 为输电线路短期最大电流运行方式是否可行提供了解决依据。并以山东某 220 kV 输电线路的实测数据为例, 验证了本文方法的可行性与有效性。

关键词: 电气工程; 输电线路; 软动态热定值; 有功功率损耗; 温度估计

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2017)20-2264-08

Soft DTR realization based on the active power loss of transmission line

RU Xuli¹, CHEN Fang¹, ZHANG Jian², SONG Shizhan², ZHANG Hui³, ZHANG Qiang³

- (1. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China;
2. Zaozhuang Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Zaozhuang, Shandong 277000, China;
3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: Soft dynamic thermal rating (DTR) is realized by estimating transmission line resistance directly, bringing problems which is hard to grasp accurately. Thus, the transmission line short time thermal dynamic rating is set up by transforming the maximum permissible temperature condition into line's active power loss limitation. The circumstance parameters in thermal balance equation are used as the state variables, and observation equation is from the differential equation of active power loss, which is deduced by relation between active power loss and resistance as well temperature. Meanwhile, state equation is set up according to time-delay parameters of the thermal equilibrium equation. Then, according to the active power loss rate of transmission line, state estimation is accomplished by Kalman filter. So far, the function of DTR is obtained, which supplies a solution to the short time maximum available current. The data of 220 kV transmission line in Shandong province is tested, and the result shows that the method proposed is feasible and valid.

Key words: electrical engineering; transmission line; soft dynamic thermal rating; active power loss; temperature estimation

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2013EEL005); 山东省高等学校科技计划 (J13LN22)

作者简介: 汝绪丽 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统网损分析

通信联系人: 陈芳, 讲师, 主要研究方向: 电力系统运行与控制. E-mail: cse_chenf@ujn.edu.cn

0 引言

输电线路静定值 (static thermal rating, STR) 是在给定光照、对流散热和辐射散热条件下确定的导体最大允许载流, 该值通常是在极端保守的环境条件下确定的, 因而在实际运行时, 不能充分发挥输电线路的真实载流能力。DTR 技术在实时测量的日照、风速和温度等环境条件下, 确定输电线路最大允许载流, 在满足输电导线允许温度的前提下, 可提高现有常规线路的输送容量, 有助于提高电网负荷高峰及 N-1 事故下的短时过负荷能力, 可以缓建或少建线路, 也可以降低新建线路的投资, 社会和经济效益显著^[1~4]。

围绕热平衡方程原理展开的 DTR 实现, 需获取输电线路温度及环境参数。该参数可通过建设相应的硬件监测设备获取^[5~7]; 也可以通过已有的电气量测信息, 采用估计方法间接得到, 后者称之为软 DTR 实现^[8~9]。软 DTR 的核心技术在于, 采用一定估计方法获取连续时间段内输电线路的温度轨迹, 进而估计热平衡微分方程的时变参数。该方法在估计温度时, 首先对输电线路电阻进行估计, 进而根据电阻与温度之间的耦合关系将其转化为温度参数。文献^[10]采用平差法改进温度估计的精度, 但该方法存在平滑矩阵与正规矩阵选取的问题^[11~13]。在此过程中, 主要存在两个问题: 一方面, 不论是对电阻估计, 还是将估计的电阻转化为温度参数, 均极易受量测误差影响, 并有误差放大的现象^[10], 因而, 温度的估计结果很难达到一般工程应用的要求; 另一方面, 在载流量较为平稳的时间段内, 输电线路温度变化较小, 对时变参数实行估计求解时, 易出现方程奇异现象, 从而影响软 DTR 的实际应用。

基于上述背景, 本文提出以输电线路电阻为基础、以线路有功功率损耗为核心的软 DTR 实现方法。该方法考虑到输电线路电阻与输电线路温度之间的线性关系, 在输电线路载流一定的情况下, 输电线路的实时功率损耗与电阻也呈现线性关系。因此, 对输电线路最高温度限定, 可以转化为一定载流条件下, 输电线路损耗的最大允许值; 基于此, 建立以输电线路有功功率损耗为核心的量测方程, 采用卡尔曼滤波的方法对环境时变参数进行估计, 避免对输电线路电阻进行直接估计以及电阻进一步转化为输电线路温度时带来的误差, 为软 DTR 技术的实践应用提供一种合理的解决方案。

1 基于 SCADA 量测的软 DTR

图 1 为输电线路 π 型等值电路, 其中, 集中阻抗由电阻 R 和电抗 X 组成, 对地导纳为 $Y = jB_0$, 本文暂忽略电导因素。

输电线路电阻与温度的关系为

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) = R_0[1 + \alpha(T_c - T_0)], \quad (1)$$

其中, T_c 为输电线路实际温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_0 为厂家设定参考温度 ($^{\circ}\text{C}$); R_0 为对应参考温度的电阻 (Ω); α 为对应输电线路材料的温度变化系数 ($1/^{\circ}\text{C}$), 对于铝, $\alpha=0.0036$, 对于铜, $\alpha=0.00382$ 。

由式 (1) 可得

$$T_c = \frac{R}{\alpha R_0} - \frac{1}{\alpha} + T_0. \quad (2)$$

针对任一时间断面的输电线首末节点电压幅值 V_{1m} 、 V_{2m} , 首末端电流幅值 I_{1m} 、 I_{2m} , 输电线路有功功率及无功功率损耗 P_m 、 Q_m , 对电阻 R 进行估计, 根据电阻与输电线路间的耦合关系, 即可得到输电线路的温度估计。对连续不断的多个时间断面进行持续估计即可获取输电线路的温度轨迹 $T_1, T_2, \dots, T_k, \dots$

在输电线路运行中, 短时间内载流引起的发热在工程上可简化表达为如下微分方程^[14]:

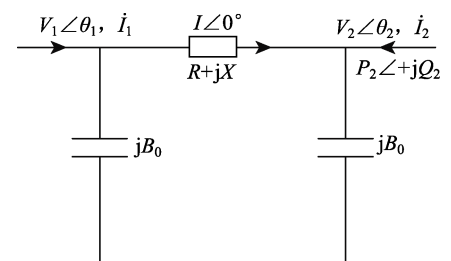


图 1 输电线路 π 型等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of π Model of transmission line

$$\frac{d(T_c - T_a)}{dt} = \theta_1(T_c - T_a) + \theta_2 I^2, \quad (3)$$

其中, θ_1 、 θ_2 为环境时变参数, 短时间内可认为保持不变; T_a 为输电线路所处大气温度, 与 θ_1 、 θ_2 类似, 该参数在研究时段内变化缓慢。

令待估时变参数为 $[\theta_1 \ \theta_2]^T$, 在短时间内考虑大气环境温度 T_a 不变的情况下, 针对式 (3) 用一定的估计方法, 即可获得时变参数。至此, 根据实测 SCADA 数据, 在估计输电线路温度轨迹的同时, 又可实现对时变参数的跟踪估计, 从而实现软 DTR 的功能。

2 基于有功功率损耗的软 DTR

采用软 DTR 技术对输电线路温度 T_c 进行估计, 存在的主要问题为首先要估计输电线路电阻 R , 对含有误差项的估计值 \hat{R} 进一步通过式 (1) 转化为温度时, 会出现估计误差被进一步放大, 使最终输电线路温度的估计值 \hat{T}_c 远远超出合理范围, 从而使时变参数的估计无法进行。

正常运行条件下, 输电线路电阻与输电线路温度之间为线性关系, 输电线路允许运行的最高温度的限制条件, 即为输电线路实时电阻的运行区间。在输电线路载流一定的情况下, 输电线路的实时有功功率损耗与电阻也呈现线性关系:

$$P = I^2 R. \quad (4)$$

因此, 对输电线路最高温度限定, 可以转化为一定载流条件下, 输电线路损耗的最大允许值。

将式 (2) 代入式 (3), 经化简可得

$$\frac{dR}{dt} = \theta_1 [R - R_0 + \alpha R_0 (T_0 - T_a)] + \alpha R_0 \theta_2 I^2 + \alpha R_0 \frac{dT_a}{dt}. \quad (5)$$

比较式 (3) 和式 (5) 可知, 两者表达载流引起的发热微分方程完全等效, 即基于输电线路载流温度变化的 DTR 技术, 可以转化为依据输电线路电阻的变化轨迹来实现。

将式 (5) 进行差分, 则相邻时刻电阻差为

$$\begin{aligned} \Delta R_k &= R_{k+1} - R_k \\ &= \theta_1 [R_k - R_0 + \alpha R_0 (T_0 - T_a)] \Delta t + \alpha R_0 \theta_2 I_k^2 \Delta t + \alpha R_0 \Delta T_a. \end{aligned} \quad (6)$$

设相邻时刻电阻及电流分别为

$$\begin{aligned} I_{k+1} &= I_k + \Delta I_k, \\ R_{k+1} &= R_k + \Delta R_k, \end{aligned} \quad (7)$$

依据式 (4), 则输电线路相邻时刻线损的变化率为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_k}{\Delta t} &= \frac{P_{k+1} - P_k}{\Delta t} \\ &= I_k^2 \frac{\Delta R_k}{\Delta t} + 2I_k R_k \frac{\Delta I_k}{\Delta t} + \frac{2I_k \Delta I_k \Delta R_k + \Delta I_k^2 R_k + \Delta I_k^2 \Delta R_k}{\Delta t} \\ &= I_k^2 \frac{\Delta R_k}{\Delta t} + 2P_k \frac{\Delta I_k}{I_k \Delta t} + \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, Δt 为采样间隔 (s); ΔP_k 为相邻时刻输电线路有功功率损耗之差; ΔI_k 为相邻时刻输电线路载流量之差。

$$\Delta \varepsilon_0 = 2I_k \Delta I_k \Delta R_k + \Delta I_k^2 R_k + \Delta I_k^2 \Delta R_k. \quad (9)$$

正常运行情况下，相邻时刻电流、电阻变化极小，易知二次项 $\Delta\varepsilon_0 \approx 0$ 。

将式 (7) 代入式 (8)，经整理得

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_k}{\Delta t} &= 2P_k \frac{\Delta I_k}{I_k \Delta t} + P_k \theta_1 + \alpha R_0 I_k^4 \theta_2 + I_k^2 R_0 \left(\alpha T_0 \theta_1 - \theta_1 + \alpha \frac{\Delta T_a}{\Delta t} \right) + \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta t} \\ &= 2P_k \frac{\Delta I_k}{I_k \Delta t} + P_k \theta_1 + \alpha R_0 I_k^4 \theta_2 + R_0 I_k^2 \theta_3 + \frac{\Delta \varepsilon_0}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中， $\theta_3 = (\alpha T_0 - 1)\theta_1 + \frac{\alpha}{\Delta t} \Delta T_a + \frac{1}{R_0 I_k^2 \Delta t} \Delta \varepsilon_0$ ，由于 $\Delta \varepsilon_0 \approx 0$ ， $\Delta T_a \approx 0$ ， θ_1 变化缓慢，则 θ_3 也为一渐变参数。

令 $y(k) = \frac{\Delta P_k}{\Delta t} - 2P_k \frac{\Delta I_k}{I_k \Delta t}$ ，则式 (10) 可简写为

$$y(k) = P_k \theta_1 + \alpha R_0 I_k^4 \theta_2 + R_0 I_k^2 \theta_3. \quad (11)$$

至此，令 $\mathbf{x} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ ，易知状态变量各元素作为连续缓慢变化的参数，具有马尔可夫过程的特征，其状态转移方程可写为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\omega}(k), \quad (12)$$

其中， $\boldsymbol{\omega}(k)$ 为离散高斯白噪声。

式 (11)、式 (12) 构成系统的离散状态空间表达式：

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \boldsymbol{\omega}(k), \\ y(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + v(k), \end{cases} \quad (13)$$

其中， k 为采样时刻 $1, 2, 3, \dots$ ； $\boldsymbol{\omega}$ 、 v 为离散高斯白噪声；

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} P_k & \alpha R_0 I_k^4 & R_0 I_k^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中， P_k 为 k 时刻输电线路的有功功率损耗 (MW)； I_k 为 k 时刻输电线路载流 (kA)； R_0 为输电线路在参考温度 (20℃) 时的集中参数电阻值 (Ω)。

3 短时载流可行性判定

通过追踪输电线路实时有功功率损耗的变化，可实现未来短时间内载流量是否越限的判定，方法如下：

- 1) 取最近时间段输电线路采样值 $P_1, I_1, P_2, I_2, \dots, P_k, I_k$ 。
- 2) 构造 $y(1), y(2), \dots, y(k)$ ； $\mathbf{H}(1), \mathbf{H}(2), \dots, \mathbf{H}(k)$ 。
- 3) 对式 (13) 采用卡尔曼滤波估计 $\hat{\mathbf{x}}(1), \dots, \hat{\mathbf{x}}(k)$ 。
- 4) 输入 $k+1$ 时刻起，未来 t 时间段内载流变化趋势 $I_{k+1}, I_{k+2}, \dots, I_{\text{end}}$ 。
- 5) 依据式 (10) 预测未来时段输电线路损耗变化 $P_{k+1}, P_{k+2}, \dots, P_{\text{end}}$ 。
- 6) 若 $P_{\text{end}} < P_{\text{max}}$ ，则当前载流运行方式可行；否则，不可行。 P_{max} 为最大允许有功功率损耗。

4 误差分析方法

测量精度将直接影响后续的动态微分方程参数的估计结果是否可用，因此，本文对测量误差进行比较分析。

本文提出的方法主要依赖于研究时段内的线损率变化, k 时刻线损变化率的量测值为

$$z_1 = \frac{P_{m,k+1} - P_{m,k}}{\Delta t}, \quad (15)$$

其中, $P_{m,k+1}$ 、 $P_{m,k}$ 分别为相邻时刻输电线路的有功功率测量值, 为直接测量。

在一系列对 P_m 等精度测量中, 对 z_1 的测量标准差可直接按下式计算^[15]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}}, \quad (16)$$

其中, n 为测量次数; δ_i 为测量误差, 即测量值与真值之差。

采用追踪输电线路温度的方法进行时变参数估计, 其量测值为

$$z_2 = \frac{\hat{T}_{m,k+1} - \hat{T}_{m,k}}{\Delta t}, \quad (17)$$

其中, $\hat{T}_{m,k+1}$ 、 $\hat{T}_{m,k}$ 分别为相邻时刻输电线路的温度值, 在不能直接测量输电线路温度的情况下, 该值根据输电线路有功功率的量测值, 选取一定估计方法进行确定。

由式(17)可知, z_2 作为间接量测值, 其误差主要来源于两方面: 一方面为有功功率量测误差, 另一方面为所选估计方法产生的估计误差。因此其量测误差不能直接获取, 只能通过蒙特卡罗模拟进行统计分析, 分析指标仍采用式(16)测量标准差。

可定义 k 时刻输电线路有功功率量测方程为

$$P_{m,k} = P_{\text{true},k} + v + s, \quad (18)$$

其中, $P_{m,k}$ 、 $P_{\text{true},k}$ 分别为 k 时刻有功功率量测、有功功率真值; v 为随机误差, 服从均值为0的正态分布; s 为系统误差。

5 算例分析

选择山东省菏泽地区某 220 kV 线路为例, 该输电线路参数 $R_0 = 2.529 \Omega$, $X_0 = 15.464 \Omega$, $B_0 = 99.583 \times 10^{-6} \text{ S}$. 算例对两种方法进行了比较。

方法 1: 参考文献[10]直接估计输电线路温度, 并根据温度变化率估计微分方程时变参数;

方法 2: 本文提出的追踪输电线路有功功率损耗, 直接估计微分方程时变参数。

根据计算需要, 取 2013 年 1 月某日 15:50—17:30 的 SCADA 实测数据 (如表 1 所示), 采样间隔为 5 min. 采用文献[10]方法进行估计, 前 3 个时刻的结果如表 2 所示。

将表 2 中的数据作为真值, 利用式(18)的量测方程, 采用蒙特卡罗模拟方法模拟有功功率损耗值, 随机误差 $v \sim N(0, 0.01)$; 以该值作为测量值, 采用方法 1 估计输电线路温度, 经模拟, 量测值 z_1 及 z_2 的相对标准差 σ 分别为 0.35 和 0.52. 结果表明, 尽管方法 1 采用了平差模型消除系统误差, 其间接量测的误差仍然有放大的趋势。

采用方法 1 对表 1 数据进行温度估计, 并根据温度变化进一步按照文献[9]的方法进行动态参数估计, 结果如表 3 所示。

表 1 输电线路实时测量数据

Tab. 1 Real-time measurement data of transmission line

k	P_k/MW	I_k/kA	γ_k	H_1	H_2	H_3
1	2.369 0	0.599 2	-0.001 1	2.369 0	0.003 8	2.683 0
2	2.467 5	0.600 3	0.018 7	2.467 5	0.003 8	2.724 4
3	2.833 0	0.613 8	0.057 8	2.833 0	0.004 2	2.734 0
4	3.053 0	0.608 7	0.050 2	3.053 0	0.004 0	2.858 2
5	2.963 0	0.610 3	-0.019 8	2.963 0	0.004 1	2.811 4
6	2.576 3	0.605 7	-0.072 6	2.576 3	0.003 9	2.825 5
7	2.511 0	0.611 5	-0.019 0	2.511 0	0.004 1	2.783 4
8	2.677 3	0.624 0	0.020 0	2.677 3	0.004 4	2.837 5
9	2.664 3	0.632 8	-0.012 0	2.664 3	0.004 7	2.954 0
10	2.573 7	0.634 4	-0.019 8	2.573 7	0.004 7	3.037 8
11	2.352 0	0.646 0	-0.055 3	2.352 0	0.005 1	3.053 6
12	2.357 3	0.380 0	0.008 6	2.357 5	0.004 9	3.166 3
13	2.410 0	0.646 0	0.002 9	2.410 0	0.005 1	3.088 6
14	2.499 3	0.645 0	0.018 9	2.499 3	0.0051	3.166 3
15	2.570 3	0.650 7	0.008 3	2.570 3	0.005 3	3.156 0
16	2.670 7	0.668 3	0.001 3	2.670 7	0.005 8	3.212 4
17	2.865 3	0.677 7	0.028 2	2.865 3	0.006 2	3.388 4
18	3.029 3	0.693 0	0.014 2	3.029 3	0.008 6	3.484 2
19	3.044 0	0.712 4	-0.020 6	3.044 0	0.007 5	3.643 9
20	3.279 0	0.732 9	0.020 1	3.279 0	0.008 4	3.850 1
21	3.555 7	0.750 5	0.030 3	3.555 7	0.009 3	4.075 0

仍取表 1 数据，采用本文方法，利用卡尔曼滤波技术，式 (11) 的状态变量估计结果如表 4 所示。

表 4 数据显示，各状态变量变化缓慢，且各变量值在短时间内可视为不变。

该输电线路型号为 LGJ-400，按最高允许温度 80℃ 计算，该输电线路最大允许电流为 0.77 kA。此时输电线路实际电流已接近其极限值。假定未来 30 min，该输电线路仍将承担较大的负荷电流，电流在 15 min 内上升至 $I_0=0.85$ kA，随后在 0.85 kA 附近运行 15 min。取最后时刻估计结果作为初始状态： $P_0=3.555$ MW， $I_0=0.75$ kA， $\mathbf{x}_0=[0.007 \ -0.478 \ 7 \ 0.000 \ 5]$ ，根据线损、电阻温度之间关系，得到该输电线路在该时间段内的最大允许线损。根据本文方法计算未来 30 min 输电线路有功功率损耗变化曲线，如图 2 所示。

由图 2 可知，在 30 min 内输电线路有功功率损耗随电流增大迅速上升，在 15 min 后电流稳定在 0.85 kA，有功功率损耗在 4.4~4.6 MW 之间波动，远小于输电线路在最高允许温度 80℃ 时的最大功率损耗值 $P_{\max}=6.67$ MW，表明尽管大于标准允许电流值，但短期运行在 0.85 kA，对输电线路而言仍在安全范围内。

表 2 输电线路温度估计结果

Tab. 2 Estimation result of transmission line temperature

k	I/kA	$T/^\circ\text{C}$	$S/\%$
1	0.599	49.99	-0.059
2	0.600	49.99	-0.058
3	0.613	50.00	-0.055

表3 方法1的估计结果

Tab. 3 Estimation result of Method 1

k	T_c	θ_1	θ_2	θ_3
1	49.91	—	—	—
2	49.78	-0.047 3	2.772 1	1.366 8
3	50.08	-0.047 3	2.772 1	1.366 8
4	50.31	-0.029 3	2.188 6	0.675 9
5	50.26	-0.033 2	0.594 5	1.440 6
6	49.72	-0.013 4	0.370 2	0.535 0
7	49.79	-0.014 2	0.370 3	0.577 6
8	50.16	-0.008 3	0.251 0	0.324 5
9	50.05	-0.006 4	0.178 8	0.253 9
10	50.15	-0.005 8	0.086 6	0.261 4
11	49.71	-0.005 1	0.045 7	0.240 9
12	49.99	-0.005 0	0.0196	0.245 6
13	49.93	-0.004 2	0.005 4	0.209 3
14	50.03	-0.004 2	0.003 3	0.210 1
15	50.00	-0.004 2	0.003 1	0.210 0
16	49.87	-0.004 2	0.002 9	0.210 3
17	50.04	-0.004 2	0.000 4	0.211 6
18	50.17	-0.004 2	0.000 7	0.212 0
19	49.75	-0.004 1	0.003 6	0.206 2
20	49.94	-0.0044	-0.000 1	0.221 2
21	50.26	-0.004 2	-0.001 5	0.213 8

表4 卡尔曼滤波结果

Tab. 4 Result of Kalman filtering

k	θ_1	θ_2	θ_3
1	0.000 8	-0.479 0	-0.000 1
2	0.000 8	-0.479 0	-0.000 1
3	0.000 8	-0.479 0	-0.000 1
4	0.000 5	-0.478 9	0.000 2
5	0.000 5	-0.478 9	0.000 2
6	0.000 6	-0.478 9	0.000 0
7	0.000 5	-0.478 9	0.000 2
8	0.000 6	-0.478 9	0.000 2
9	0.000 6	-0.478 9	0.000 2
10	0.000 6	-0.478 9	0.000 2
11	0.000 5	-0.478 9	0.000 4
12	0.000 4	-0.478 9	0.000 4
13	0.000 5	-0.478 9	0.000 4
14	0.000 5	-0.478 9	0.000 4
15	0.000 5	-0.478 9	0.000 4
16	0.000 5	-0.478 8	0.000 4
17	0.000 6	-0.478 8	0.000 4
18	0.000 6	-0.478 8	0.000 4
19	0.000 6	-0.478 8	0.000 5
20	0.000 6	-0.478 7	0.000 5
21	0.000 7	-0.478 7	0.000 5

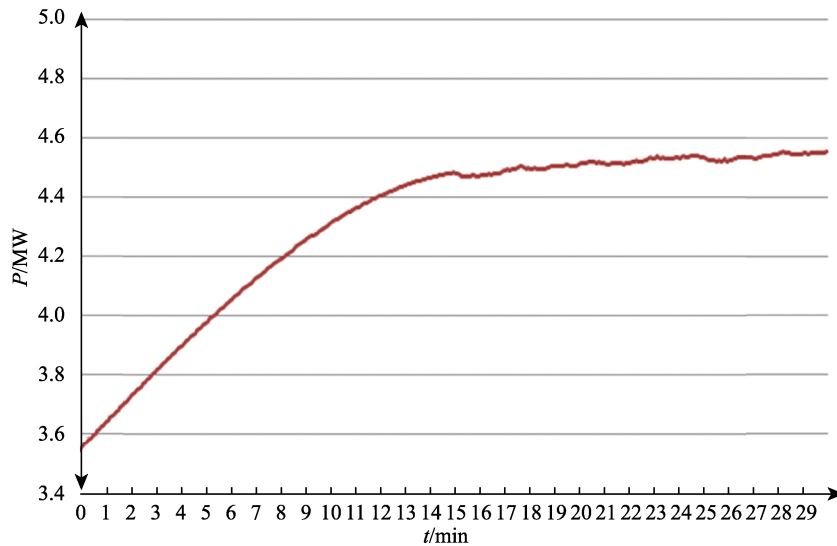


图2 输电线路有功功率损耗曲线

Fig. 2 Curve of transmission line active power loss

6 结论

研究通过追踪输电线路有功功率损耗的变化, 实现对输电线路热平衡参数的估计。经分析、论证形成结论: 1) 直接追踪输电线路有功功率损耗变化率, 相对于间接追踪输电线路温度, 前者量测精度更高, 更利于后续工作; 2) 对输电线路电阻进行直接估计, 进而获取输电线路温度会带来误差, 该误差影响了

对微分方程动态参数估计的有效性, 严重情况下会出现无解情况; 3) 将输电线路最高温度限定, 转化为一定载流条件下输电线路损耗的最大允许值, 作为短期内判断输电线路运行方式的一种方法是完全可行的。

[参考文献] (References)

- [1] 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 (19): 18-21.
ZHANG Q P, QIAN Z Y. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 18-21. (in Chinese)
- [2] ADAPA R, DOUGLASS D A. Dynamic thermal ratings: monitors and calculation methods[C]//Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa Durban. New York: IEEE, 2005: 163-167.
- [3] SEPPA T O. Increasing transmission capacity by real time monitoring[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. New York: IEEE, 2002: 1208-1211.
- [4] NASCINMENTO C A M, BRITO J M C, FILHO E B G, et al. The state of the art for increased overhead line ampacity utilizing new technologies and statistical criteria[C]//2004 IEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. New York: IEEE, 2004: 464-469.
- [5] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究[J]. 高电压技术, 2008, 34 (6): 1138-1144.
HUANG X B, SUN Q D, ZHANG G J, et al. Theoretical calculation and application study on real-time capacity-increase of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1138-1144. (in Chinese)
- [6] 房鑫炎, 杨鹏. 动态热容等级 (DTCR) 的模型及其实施方式[J]. 华东电力, 2005, 33 (7): 11-14.
FANG X Y, YANG P. DTCR model and its realization[J]. East China Electric Power, 2005, 33(7): 11-14. (in Chinese)
- [7] 秦嘉南, 刘亚东, 盛戈皞, 等. 基于线路运行参数的输电线路动态增容系统研制[J]. 电气自动化, 2015, 37 (5): 50-52.
QIN J N, LIU Y D, SHENG G H, et al. Development of a dynamic line rating system for the transmission line based on line operating parameters[J]. Electrical Automation, 2015, 37(5): 50-52. (in Chinese)
- [8] 陈芳, 韩学山, 李华东, 等. 基于相量单元的输电线路温度估计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (19): 25-29.
CHEN F, HAN X S, LI H D, et al. Tracking estimation of transmission line temperature based on PMU measurement[J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(19): 25-29. (in Chinese)
- [9] 陈芳, 韩学山, 康凯, 等. 基于 SCADA 信息追踪输电线路动态热定值[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (5): 81-84.
CHEN F, HAN X S, KANG K, et al. Tracking of dynamic thermal rating of transmission line based on SCADA[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(5): 81-84. (in Chinese)
- [10] 陈芳, 查浩, 韩学山, 等. 基于半参数平差模型的输电线路温度估计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (21): 81-86.
CHEN F, ZHA H, HAN X S, et al. Transmission line temperature estimation based on semi parametric adjustment model[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(21): 81-86. (in Chinese)
- [11] 胡宏昌, 孙海燕. 正规矩阵 R 及平滑因子 α 的选取[J]. 测绘工程, 2003, 12 (4): 5-8.
HU H C, SUN H Y. Choice of the regular matrix R and smoothing parameter α [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2003, 12(4): 5-8. (in Chinese)
- [12] ASTFALK G, LUSTING I, MASTEN R, et al. The interior-point method for linear programming[J]. IEEE Software, 1992, 9(4): 61-68.
- [13] 王振杰, 欧吉坤, 曲国庆, 等. 用 L -曲线法确定半参数模型中的平滑因子[J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2004, 29 (7): 651-653.
WANG Z J, OU J K, QU G Q, et al. Determining the smoothing parameter in iemi-parametric model using L -curve method[J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(7): 651-653. (in Chinese)
- [14] van der WEIDE L A, FOSTER C J, MACLAREN R, et al. IEEE Std.738—1993 IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors[S]. New York: IEEE, 1993.
- [15] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
FEI Y T. Error theory and data processing[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010. (in Chinese)