

# A Transmission Capacity Improvement Method Considering Transmission Line Short-Time Overload

Yingwei Song<sup>1</sup>, Fang Shen<sup>1</sup>, Yan Liu<sup>1</sup>, Zhuohang Wu<sup>1</sup>, Jingyi Fan<sup>2</sup>, Tingting Wang<sup>2</sup>, Anjia Mao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Economic and Technology Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Supply Co. Ltd., Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>North China Electric Power University, Beijing

Email: zhuohang05@163.com, 1040599388@qq.com

Received: Dec. 11<sup>th</sup>, 2015; accepted: Dec. 25<sup>th</sup>, 2015; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The limit of thermal stability is an essential part of determining the transmission capacity of the transfer section. In the traditional safety analysis, the limit is a constant value. However, in the actual power operation, it is a process of the electro-thermal coordination closely relating to the environmental factors. Based on the above statements, the paper does a study on the process of the line current-carrying and then creates a model of thermodynamics of the line. After that, we combine the model with power analysis tools, as a result, forming a calculation model of power analysis. Finally, we test the thermal stability of the line in the short-time overload environment and verify the increase on the transmission capacity in consequence.

## Keywords

Electro-Thermal Equilibrium, Short-Time Overload, Limit of Thermal Stability, Transmission Capacity

---

# 一种考虑线路短时过载的断面输电能力提高方法

宋颖巍<sup>1</sup>, 沈方<sup>1</sup>, 刘岩<sup>1</sup>, 吴卓航<sup>1</sup>, 范京艺<sup>2</sup>, 王婷婷<sup>2</sup>, 毛安家<sup>2</sup>

文章引用: 宋颖巍, 沈方, 刘岩, 吴卓航, 范京艺, 王婷婷, 毛安家. 一种考虑线路短时过载的断面输电能力提高方法[J]. 输配电工程与技术, 2015, 4(4): 124-131. <http://dx.doi.org/10.12677/tdet.2015.44013>

<sup>1</sup>国网辽宁电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>华北电力大学, 北京

Email: zhuohang05@163.com, 1040599388@qq.com

收稿日期: 2015年12月11日; 录用日期: 2015年12月25日; 发布日期: 2015年12月31日

## 摘要

输电线路的热稳定极限是确定断面输电能力时必须考虑的一个重要因素, 在传统安全分析中, 线路热稳定极限是作为一个固定不变的值来考虑的, 而实际运行中, 热稳定是一个电热平衡过程, 和环境因素密切相关。在此基础上, 研究输电线路载流机理, 建立输电线路的热力学模型, 将此模型与潮流分析充分结合, 形成电热协调的电力系统潮流求解模型和算法。在线路过负荷的测试环境下, 校验线路的热稳定性, 验证短时过负荷提高输电能力的正确性。

## 关键词

电热平衡, 短时过载, 热稳定极限, 输电能力

## 1. 引言

随着区域经济的不断发展, 地区电网负荷的逐年增加, 对输电网络的输电能力提出了更高要求, 加之节能减排理念的推行, 征地成本的增加, 开辟新的输电走廊及架设新的输电线路越来越困难。因此, 充分挖掘现有电网的输电能力, 以缓解由负荷增长带来的输电紧张, 具有很现实的意义。

长期以来, 工程上用输电线路的最大允许载流量来评价线路的传输限值[1], 并在线路设计时以此校验导线最大输电容量。运行经验表明, 这种静态线路容量极限值是保守地基于最恶劣气象条件(如晴天, 高温, 无风等), 为维持线路对地的安全距离而得出的。但从电网实际运行的情况看, 在大多数时间里电网外部的气象条件要远远好于假定的最恶劣气象条件。这就为我们在短期内适当提高线路输送能力提供了可能性[2]。除此以外, 国内设计的送电线路, 都按经济电流密度选取导线截面, 系统稳定 N-1 准则要求和现行规范 70℃ 允许温度限制[3], 导致常年输送负荷远小于导线发热允许温度的输送容量。有时不得不为短时间的线路停运、检修, 而新建一条线路[4]。

建设新的线路或者对现存线路进行技术改造、升级、或者扩建, 是目前普遍采用的提高线路输电能力的措施, 但是这种措施无疑存在投资大, 建设周期长的问题, 同时也增加了电力部门的运营成本。近年来, 随着传感与通信技术的飞速发展, 利用线路实时温度监控进行线路动态增容的技术得以发展与应用[5] [6], 尤其是在欧美发达国家, 调度标准中建议对所有重点输电线路假装实时温度实时监控装置, 从而能够确保线路在实际过载时切除线路[7], 然而, 由于系统分散性, 建立全网实时温度检测系统在短时间内难以实现。

综上所述, 在当前技术条件下, 尤其是电力系统仍处在高速发展与逐步完善时期, 充分利用现有输电设备, 挖掘线路潜在输电能力, 具有理论与实践的双重价值。本文正是基于此思想, 根据电热平衡理论, 提出了一种利用输电线路短时过负荷提高输电能力的方法, 该方法能够在保证系统安全的前提下, 提高系统运行的经济性。

## 2. 输电线路的热平衡过程

由焦耳定律可知, 输电线路上消耗的有功功率完全转换为热量。热量中的一部分提高了传输线的温

度，另一部分热量则由于环境与传输线存在温差散发到环境中(图 1)。

这个过程可以用下述方程(1)描述：

$$E_g = E_{in} - E_{out} = E_{st} + E_{con} + E_{rad} \quad (1)$$

式(1)中  $E_{in}$  表示流入传输线的初始能量， $E_{out}$  是经由传输线后的输出能量， $E_g$  为热能， $E_{st}$  表示储存在传输线上的能量即线路温升， $E_{con}$  和  $E_{rad}$  分别表示对流散热和辐射散热[8]。

因为实际的输电线路经常架设在户外，影响能量平衡的因素不仅包括式(1)所涉及的因素，而且还包括太阳照射产生的热量。因此，能量平衡方程式修正如(2)式：

$$E_g + E_{sun} = E_{st} + E_{con} + E_{rad} \quad (2)$$

对(2)式两端同时取微分，得到(3)式：

$$\Phi_g + \Phi_{sun} = \Phi_{st} + \Phi_{con} + \Phi_{rad} \quad (3)$$

上式中， $\Phi_g$ ， $\Phi_{sun}$ ， $\Phi_{st}$ ， $\Phi_{con}$ ， $\Phi_{rad}$  分别表示从有功损耗，太阳照射，热储能，对流以及辐射产生的热通量(单位时间消耗的热量)。

根据热传递理论，可知式(4)到(9)：

$$\Phi_g = P_{loss} = i^2 r_0 (1 + a(T - 293)) \quad (4)$$

$$\Phi_{sun} = \alpha_s Q_s A_s \quad (5)$$

$$\Phi_{rad} = 5.67 \alpha_r \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right] A_r \quad (6)$$

$$\Phi_{con} = \alpha_c (T - T_a) A_c \quad (7)$$

$$\Phi_{st} = C_m M \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

$$r_0 = \frac{\lambda}{\pi(D/2)^2} \quad (9)$$

式中  $r_0$  是传输线 20 °C(293 K)时单位长度的电阻； $T$  是导体的运行温度(K)； $a$  为电阻温度变化系数； $Q_s$  表示太阳及空气的辐射强度(一般取 1000 W/m<sup>2</sup>)； $\alpha_s$  是导体吸收太阳辐射的比率，对于铝导线，一般取值为 0.6； $\alpha_r$  是与导体材料相关的辐射系数； $T_a$  是导体的环境温度； $A_s$ ， $A_r$ ， $A_c$  分别表示单位长度导体接受光照、辐射和对流的面积；对于圆柱体导线，直径为  $D$ ， $A_r = A_c = \pi D$  (m<sup>2</sup>/m)， $A_s = \pi D/2$  (m<sup>2</sup>/m)； $\alpha_c$  是对流热量的系数； $C_m$  表示导体材料的特定热量； $M$  表示单位长度导体的质量。

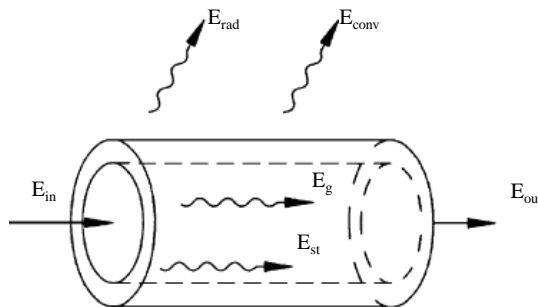


Figure 1. Thermal equilibrium process of the transmission line

图 1. 传输导线的热平衡过程

一般来说, 导体的温度不是很高并且电阻温度的影响可以忽略, 所以, 式(4)可简化为

$$\Phi_g = i^2 r_0 = \frac{P}{L} \quad (10)$$

其中  $P$  为单位长度功率。将式(5)~式(10)带入式(3)中, 可以得到动态热平衡方程式[9], 注意到导线热损耗是整个线路的, 因此, 单位长度上的热平衡方程式为:

$$C_m M \frac{dT}{dt} = \frac{P}{L} + \frac{\alpha_s Q_s \pi D}{2} - \alpha_c (T - T_\alpha) \pi D - 5.67 \alpha_r \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_\alpha}{100} \right)^4 \right] \pi D \quad (11)$$

其中  $L$  为线路总长度。式(11)所示热平衡方程包括对流和辐射因子, 因此很难求解, 实际场合中使用复合计算方法而不是直接求解该方程。也就是说, 热辐射过程可以由牛顿散热公式表达, 对流和辐射公式与其有同样的形式。因此两者合并成复合热平衡公式, 从而得到式(12):

$$C_m \rho \pi D^2 \frac{dT}{dt} = \frac{4P}{L} + 2\alpha_s Q_s \pi D - 4\alpha_m (T - T_\alpha) \pi D \quad (12)$$

在该热平衡方程中,  $\alpha_m$  是由对流和辐射产生的复合热扩散系数, 可以由两个热扩散因子和导体温度求得;  $\rho$  代表导体的密度。

通过深入研究不同的环境因素, 式(12)反映了在电流流过导体时传输线温度的变化。

当导体温度不发生变化, 式(12)简化为

$$4P = L(4\alpha_m (T - T_\alpha) \pi D - 2\alpha_s Q_s \pi D) \quad (13)$$

当热吸收与热扩散达到平衡时, 导体的温度也能够稳定, 热平衡过程即可由式(13)表示。由式(13)可以看出, 导体的载流定值与温度保持一致性, 因而在电力系统运行调度、控制的决策中可直接使用此公式确定导体的电流限值, 免去对导体温度的考虑。

然而, 此式忽略了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, 就会造成本不该发生的连锁故障, 产生不该有的经济损失。因此, 本文使用计及温度变化过程的热平衡方程(式(12)), 分析输电断面的短时过载能力。

### 3. 断面短时过载能力分析

导体最大允许温度所对应的电流值, 即是导体所允许的最大载流量  $I_{\max}$  [10] [11], 其对应的功率即是通常所说的热稳定极限  $P_{\max}$ , 作为校验线路输送能力的依据, 一般不允许被超越。

系统正常运行时, 线路的电流远小于  $I_{\max}$ , 且其环境条件(气温、日照、风速等)也远优于确定  $I_{\max}$  时的环境条件, 此时的导线温度相应远低于规范所确定的最大允许温度  $T_{\max}$ 。当负荷增长时, 导线温度将按照式(12)所示规律上升, 由于温度的上升有赖于热量的累积, 即使负荷上升到热稳定极限, 甚至超过热稳定极限时, 导线的温度也并不一定达到  $T_{\max}$ , 也就是说, 此时的系统仍然是安全的, 仍可保持过载线路的运行。如图 2 所示。

当线路长时间过载, 由(12)所确定的热平衡方程下, 有可能使得导线温度达到或超过  $T_{\max}$ , 此时必须采取措施以保证系统安全。因此, 可以通过追踪负荷变化过程中的导线温度变化规律, 允许断面短时过载运行, 进而在一定程度上增加了断面输送能力[12]。当负荷曲线变化规律已知时, 必须确定允许过载时间  $\Delta t$  和最大过载量  $\Delta I_{\max}$ , 如图 3 所示。

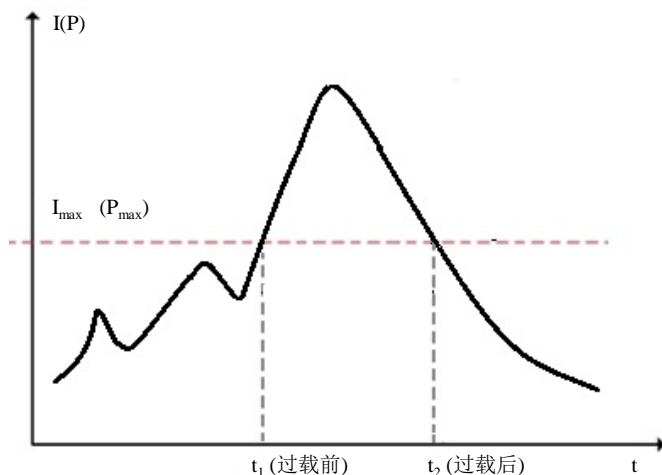


Figure 2. Diagram of the overloaded transmission line  
图 2. 线路过载示意图

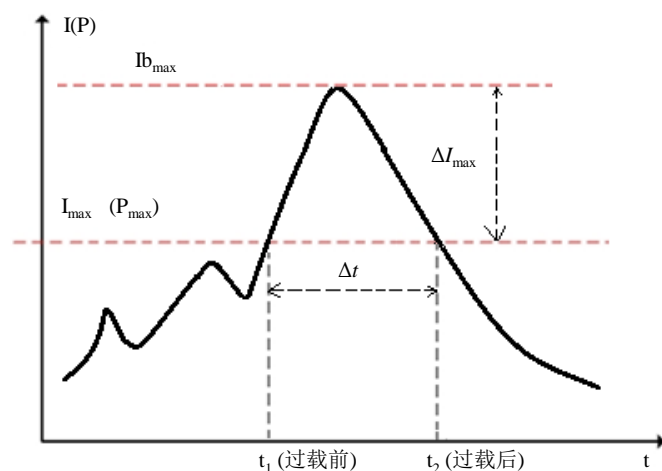


Figure 3. Overloaded ability of transmission line  
图 3. 线路过载能力示意图

## 4. 解算方法

### 4.1. 负荷曲线的分段划分

负荷曲线按照时间过程进行划分，可以对研究时间过程进行等时间间隔划分和不等时间间隔划分。等时间间隔划分，负荷曲线以日发电计划为例，往往以整点负荷表征该小时内的负荷水平；在负荷急剧变化时，整点负荷往往与系统实际负荷存在较大差异。采用融合思想[13]，考虑负荷变化情况而进行不等时间间隔划分，负荷变化平稳时，少量时间过程比长子时间段的负荷水平更接近系统的实际情况；而负荷急剧变化时，数量较多的短子时间段细致刻画了负荷曲线攀峰降谷过程，提供了充足的缓冲时间渡越陡峭段落。本文采用文献[13]的划分方法，划分情况见算例分析部分。

### 4.2. 具体计算

基于上述原理，假定某一负荷曲线(如图 4)，在线路过载的条件下，校验线路热稳定性。解算方法列写如下：

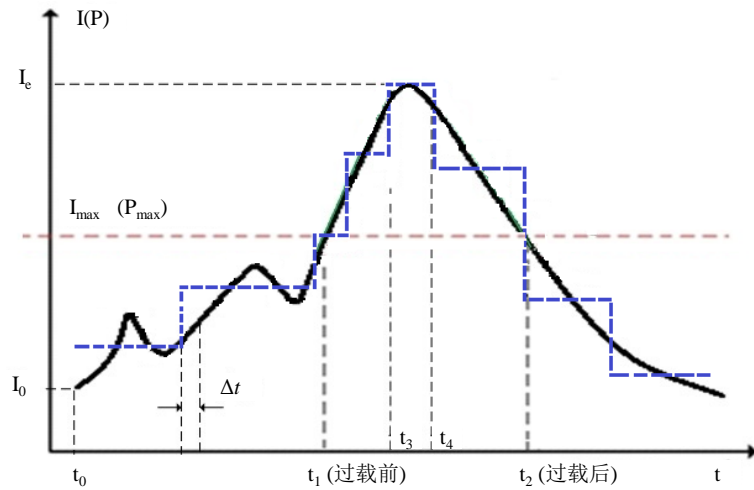


Figure 4. Solution diagram of the transmission line overloaded ability  
图 4. 线路过载能力求解示意图

在  $t_0 \sim t_1$  阶段:

- 1) 设初值, 在  $t_0$  时刻, 线路输送功率为  $P_0$ , 导体温度为  $T_0$ ; 记在  $t_1$  时刻, 线路输送功率为  $P_1$ , 导体温度为  $T_1$ 。
- 2) 把  $t_0 \sim t_1$  等分成  $n$  间隔, 每一间隔为  $\Delta t_k$ , 分别标记为  $t_{0_1}, t_{0_2}, \dots, t_{0_i}, t_{0_{i+1}}, \dots, t_{0_{n-1}}$ ; 相应时刻的导体温度标记为  $T_{0_1}, T_{0_2}, \dots, T_{0_i}, T_{0_{i+1}}, \dots, T_{0_{n-1}}$ 。
- 3) 在  $t_{0_i} \sim t_{0_{i+1}}$  的时间间隔内, 令线路输送功率  $P$  保持不变, 取  $P = P_{0_i}$ 。
- 4) 求解动态平衡方程(12), 变形后的积分方程(14), 得  $T_{0_{i+1}}$ , 最终可计算出  $t_1$  时刻导体温度  $T_1$ 。

$$\int_{T_{0_i}}^{T_{0_{i+1}}} \frac{C_m \rho \pi D^2}{[4P + 2\alpha_s Q_s \pi D - 4\alpha_m (T - T_\alpha) \pi D]} dT = \int_{t_{0_i}}^{t_{0_{i+1}}} dt \quad (14)$$

在  $t_1 \sim t_2$  (过载)阶段:

- 5) 记在  $t_2$  时刻, 线路输送功率为  $P_2$ , 导体温度为  $T_2$ ; 若导体温度  $T < T_{\max}$ , 线路满足热稳定性; 若  $T \geq T_{\max}$ , 线路不满足热稳定性。对  $t_1 \sim t_2$  阶段, 将曲线拟合成分段状曲线, 记在  $t_3$ 、 $t_4$  时刻, 线路输送功率分别为  $P_3$ 、 $P_4$ , 导体温度分别为  $T_3$ 、 $T_4$ 。
- 6) 以前面求得的  $T_1$  为初值, 求解积分式(14), 可得  $T_4$ 。
- 7) 校验  $T_4$  是否小于  $T_{\max}$ 。

## 5. 算例分析

假定区域 A、B 之间双回联络线为 LAB, 线路阻抗  $Z_{AB} = 4.1619 + j52.0656 \Omega$ , 电压等级为 500 kV, 线路额定电流 1500 A, 如图 5 所示。

假设环境温度为 30 °C(303 K), 导线初始温度 35 °C, 线路长度 300 km, 式(12)中各常数取值如表 1 所示, 并假设图 3 中负荷曲线分段后各段负荷及持续时间如表 2 所示, 图中, 线路设定最大功率  $P_{\max} = 300 \text{ MW}$ 。

代入表 1, 表 2 数据, 解方程(14), 得各时段线路温度如表 3 所示。

从计算结果可以看出, 随着负荷的增长, 线路的温度也随之增长, 但其增长具有滞后特性, 利用这种滞后特性, 可以在时过载的情况下保证线路温度低于最大允许温度, 进而提高线路的输送能力。

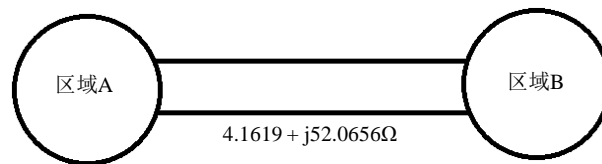


Figure 5. Diagram of an interconnected system and its cross section

图 5. 互联系统及其断面示意图

Table 1. Value of the constant in (12)

表 1. 热平衡方程式(12)中的常数取值

$C_m$ (J/(kg·K))	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D$ (mm)	$\alpha_s$	$Q_s$ (W/m <sup>2</sup> )	$\alpha_m$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))
$0.88 \times 10^3$	$2.7 \times 10^3$	30	0.6	1000	200

Table 2. Time interval and average load of the curve

表 2. 各时段时长及负荷均值

时段	1	2	3	4	5	6	7	8
时长(h)	1	1.5	0.5	0.5	0.5	1	1.5	2
功率(MW)	200	250	300	370	420	360	240	180

Table 3. Conductor temperature of the transmission line at each time interval

表 3. 各时段线路温度

时段	1	2	3	4	5	6	7	8
温度(°C)	40.41	41.18	41.48	41.86	42.28	43.01	43.50	43.87

## 6. 结束语

本文根据传热学分析了输电线路温度变化过程中涉及到的对流散热、辐射散热、日照吸热，以及焦耳热等知识，为建模过程的能量变化提供基础。建立以输电线路电流为变量的，同时又是导体温升的函数的热平衡微分方程将此模型与潮流分析充分结合，形成电热协调的电力系统潮流求解模型和算法。在过负荷的情形下，应用该模型，校验线路的热稳定性。算例分析表明了短时过负荷提高输电能力的可行性。短时过负荷提高输电能力的优点在于其经济性，但是由于本文探讨的方法还存在风险水平未知等诸多问题，有待于今后深入的研究。

## 致 谢

在研究过程中，万分感谢对本论文给予帮助的老师以及专家，同时更加感谢给予转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者的分享。

## 参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 丁希亮. 电热协调及其应用研究[D]. [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2007.
- [3] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 5092-1999. 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: 457-458.

- [4] 叶鸿声, 龚大卫, 黄伟中, 等. 提高导线允许温度增加线路输送容量的研究[C]//中国电机工程学会. 中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集, 2004: 495-503.
- [5] 刘刚, 阮班义, 林杰, 杨敏, 张鸣, 许志澄. 架空导线动态增容的热路法稳态模型[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1107-1113.
- [6] 杨国庆. 基于在线监测系统的输电线路动态增容研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海电力学院, 2012.
- [7] Adpa, R. and Douglass, D.A. (2005) Dynamic Thermal Ratings: Monitors and Calculation Methods. 2005 *IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*, Durban, 11-15 July 2005, 163-167.  
<http://dx.doi.org/10.1109/PESAFR.2005.1611807>
- [8] 李银艳. 架空输电线路暂态热平衡模拟及风险评估[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [9] 李天助. 高压输电线路动态增容理论及软硬件系统设计研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [10] Davis, M.W. (1977) A New Thermal Rating Approach: The Real Time Thermal Rating System for Strategic Overhead Conductor Transmission Lines, Part I. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **96**, 803-809.  
<http://dx.doi.org/10.1109/T-PAS.1977.32393>
- [11] Davis, M.W. (1977) A New Thermal Rating Approach: The Real Time Thermal Rating System for strategic Overhead Conductor Transmission Lines, Part II. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **96**, 810-825.  
<http://dx.doi.org/10.1109/T-PAS.1977.32394>
- [12] 舒隽, 关睿, 韩冰, 韩翊. 考虑电热耦合效应的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2015(19): 48-53.
- [13] 余加喜, 白雪峰, 郭志忠, 刘瑞叶. 考虑负荷变化率的日发电计划[J]. 电力系统自动化, 2008(18): 30-34.