

「电线」

架空导线动态增容分析及计算新方法

文/广东电网公司东莞供电局 李天助 钟建强 罗子勉 王 微

架空导线在出厂制定的静态输电容量的基础上有极大的潜在输电能力，架空导线的动态增容技术能够有效地发掘其潜在输电能力，然而当前动态增容技术计算出的动态输电容量值波动性大，实际应用性不强。针对当前动态增容技术存在的问题，提出了架空导线动态增容输电容量的计算新方法，能够显著地降低动态输电容量值的波动性，提高动态增容技术的实际应用性。

架空导线的额定输电容量是为防止导线温度超过相关标准所规定的上限值而制定的线路静态热容量极限值。架空导线的真实热容量极限值除与导线本身的物理特性有关外还与导线所处的环境温度、日照辐射强度、风速和风向等因素有关。导线的出厂输电容量是假定导线同时处于日照强度大、风速低等极端恶劣的气象条件下基于静态热平衡方程计算得到的静态热容量值。极端恶劣的气象条件出现概率小，气象条件对架空导线的热容量值影响大，因此架空导线在出厂输电容量的基础上有极大的潜在输送容量。

根据实时的气象条件基于架空导线的热平衡方程求解架空导线的实时输电容量这是当前提高架空输电线路输电容量的研究热点，研究表明，架空导线的动态载流量相比于其出厂所制定的输电容量能提高40%左右。

当前国内外主流的架空导线热容量的计算方法有摩根（Morgan）公式、电子工程师协会（IEEE）推荐的“IEEE Std 738TM—2006”、国际大电网会议（CIGRE）推荐的“架空导线的热特性”等。不同的方法间架空导线热平衡方程两边的项式都是一样的，区别在于两边项式的具体计算方法有所差别。对架空导线动态载流量的分析与计算都是基于电子工程师协会（IEEE）推荐的“架空裸导线的温度—电流计算”。

架空导线的热稳态平衡方程

需说明的是，本文中的所有计算公式等式两边数值相等，但量纲不一定相符。

IEEE Std 738TM—2006计算标准的稳态热平衡方程为

$$q_c + q_r = q_s + q_j \quad (1)$$

式中， q_c 为对流散热，单位为W； q_r 为热辐射散热，单位为W； q_s 为太阳辐射吸热，单位为W； q_j 为电流作用下导线的焦耳热，单位为W。

1. 对流散热

IEEE Std 738TM—2006将对流散热分为强风对流、弱风对流及自然对流分别计算，再取三者中的最大值作为架空导线的对流散热。

强风对流散热为

$$q_{c1} = \left[1.01 + 1.3507 \left(\frac{D_{pf} v_w}{\mu_t} \right)^{0.52} \right] k_f K_{angle} (T_c - T_a) \quad (2)$$

弱风对流散热为

$$q_{c2} = \left[0.7508 \left(\frac{D_{pf} v_w}{\mu_t} \right)^{0.6} k_f K_{angle} (T_c - T_a) \right] \quad (3)$$

自然对流散热为

$$q_{cn} = 3.645 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25} \quad (4)$$

式（2）～式（4）中， D 为导线直径，单位为m； T_c 为导线温度，单位为℃； T_a 为环境温度，单位

为℃； v_w 为风速，单位为m/s； ρ_f 为空气密度，其数值计算如式（5）所示。

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 \times 10^{-4} H_e + 6.379 \times 10^{-9} H_e^2}{1 + 0.00367 T_{\text{film}}} \quad (5)$$

式中， H_e 为导线所处海拔，单位为m； T_{film} 为导线附近空气膜的温度，单位为℃，其计算式为

$$T_{\text{film}} = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (6)$$

式（2）～式（4）中， K_{angle} 为风向因子，其计算式为

$$K_{\text{angle}} = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi) \quad (7)$$

式中， ϕ 为风向与导线轴向的夹角，单位为（°）。

式（2）～式（4）中， μ_f 为空气动力黏度，其数值计算如式（8）所示。

$$\mu_f = \frac{1.458 \times 10^{-6} (T_{\text{film}} + 273)^{1.5}}{T_{\text{film}} + 383.4} \quad (8)$$

式（2）～式（4）中， k_f 为空气热导率，为

$$k_f = 2.424 \times 10^{-2} + 7.477 \times 10^{-5} T_{\text{film}} - 4.407 \times 10^{-9} T_{\text{film}}^2 \quad (9)$$

根据研究，对流散热占导线总散热的80%以上，且风速对对流散热值的计算影响很大，因此风速对导线输电容量影响很大。

2. 导线的热辐射散热

导线的热辐射散热值为

$$q_r = \pi D \delta \sigma_B [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (10)$$

式中， δ 为导线的热辐射系数，一般取值为0.5； σ_B 为波尔兹曼常数，为 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$

根据本文的研究，导线的热辐射散热占导线散热的比值较少。

3. 导线的太阳辐射吸热

导线太阳辐射吸热为

$$q_s = Q_s A \varepsilon \quad (11)$$

式中， Q_s 为日照辐射强度，单位为 W/m^2 ； A 为单位长度导线横向投影面积，单位为 m^2 ； ε 为导线对太阳辐射的吸收系数，取值一般与 δ 相同。

4. 导线的焦耳热

导线焦耳热为

$$q_j = I^2 R(T_c) \quad (12)$$

式中， $R(T_c)$ 为导线温度 T_c 下导线的交流电阻，单位为 Ω ； I 为导线的热稳定容量值，由式（12）逆推其值为

$$I = \sqrt{\frac{q_j}{R(T_c)}} \quad (13)$$

架空导线动态输电容量计算的传统法

架空导线动态输电容量计算的传统方法是根据气象传感器传回的当前实测气象条件数据结合导线的参数，将导线温度设为国家标准规定的最高允许温度（70℃），求得导线的对流散热、日照吸热和热辐射散热，代入导线热平衡稳态方程求得焦耳热，再通过式（13）求得架空导线的动态输电容量值。由于数据传输网络带宽的限制，气象传感器数据的采集是离散的。下表展示了广东电网一段安装了气象传感器的架空导线1h的气象数据。

表1 气象数据

时间	风速/(m/s)	风向/(°)	日照强度/(W/m^2)	环境温度/℃
09:00	1.51	52	414	16.6
09:05	1.83	49	416	16.8
09:10	2.07	56	428	16.7
09:15	1.82	50	425	17.1
09:20	2.34	44	368	17.2
09:25	2.67	63	454	17.4
09:30	1.98	41	488	17.3
09:35	3.24	58	436	17.4
09:40	1.35	54	497	17.9
09:45	2.33	60	502	17.4
09:50	3.11	51	513	17.1
09:55	2.13	56	497	17.6
10:00	1.65	47	536	17.7

由上表可知，环境温度变化非常缓慢，日照强度的变化也比较缓慢，但对于影响输电容量最大的风向、风速变化却很大。图1为广东电网某条输电线路在某天的历史气象数据下传统法计算绘制出的动态输电容量示意图。

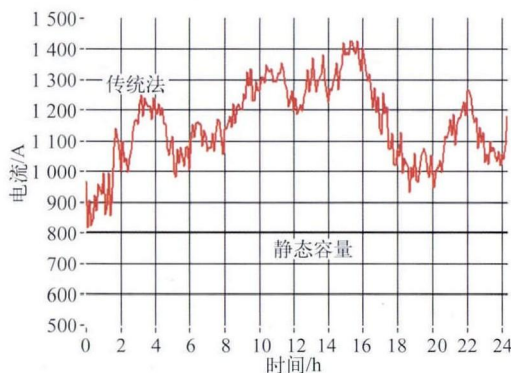


图1 传统法计算的动态输电容量

由图1知，传统法计算出的动态输电容量曲线图曲线波动性大，数值变化快。对于电网调度，

输电容量变化越快,调度的可操控性越差。因此,动态输电容量计算传统方法的实际应用性不够强。

新的计算方法

为减少动态输电容量的波动性,提出了动态输电容量改进的新算法。

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} I_i^2}{n}} \quad (14)$$

式中, I_i 为当前时刻的前 i 个测量间隔气象条件数据计算出的动态输电容量。例如,测量间隔为 5 min,当前时刻为 12:00,计算 12:00 的动态输电容量时 I_5 为 11:35 采集的气象条件数据对应的传统法计算出的动态输电容量值。研究表明, n 取值越大,新方法计算出的动态输电容量绘制的曲线波动性就越小。 n 值取 6,新方法对图 1 所对应的历史气象数据计算出导线动态输电容量绘制的曲线如图 2 所示。

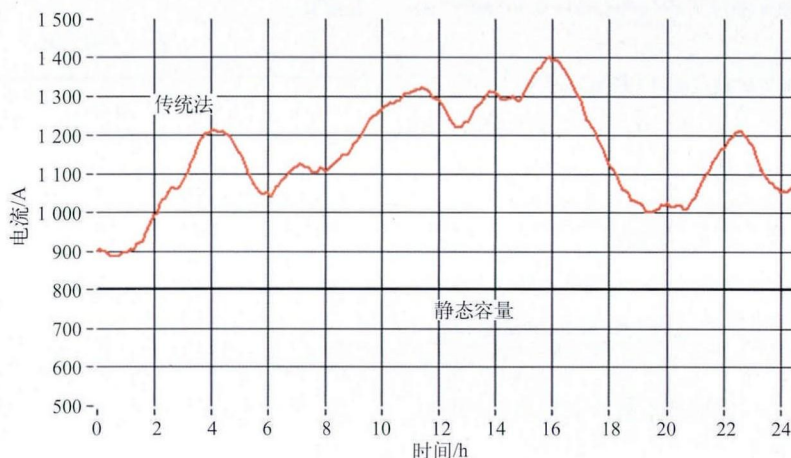


图2 新方法计算出绘制的动态输电容量值曲线

算法的可行性仿真分析

图2所示的动态输电容量并不是导线实际的输电量,导线的温度分析仅能通过仿真分析,且风速、风向和日照等气象条件都一直在变化,为此,假定气象条件数据在两个相邻数据采集间隔内保持不变。若架空导线通图2所示的电流,导线的发热不等于散热,导线的温度通过式(15)由暂态热平衡方程来求得。

$$q_c + q_r + mc_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + q_j \quad (15)$$

式中, m 为单位长度导线质量,单位为 kg; c_p 为导线的比热容,单位为 J/kg·℃。

若架空导线通图2所示电流,导线的温度仿真曲线如图3所示。

由图3可知,导线温度在一个很小的范围内变动,短时间偏离国家标准规定的 70℃ 仍能保证架空导线的安全可靠运行。研究表明, n 取值越大,导线仿真温度的波动性越大,鉴于 n 取 6 动态输电容量曲线已经非常缓和、波动性小,因此 n 取 6 是非常合适的。

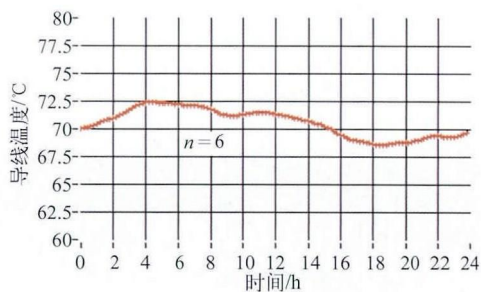


图3 导线温度仿真效果图

结束语

1) 架空导线有极大的潜在输电能力,架空导线根据实时气象条件计算实时的动态输电量能显著地提高输电容量。

2) 动态增容传统法计算出的实时动态输电容量波动性大,实际应用性不高,改进后的算法计算出的动态输电容量波动性小,且仿真导线温度在合理区间内,能显著提高动态增容的实际应用性。EA

(收稿日期:2016.05.30)

(编辑:刘群彦)