

一种超高压输电线路动态增容方法

吉兴全¹, 杜彦宾¹, 李可军², 袁沔齐³

(1. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061;
3. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 为充分挖掘超高压线路的输电潜能, 在保持现有输电线路不变, 同时保证线路安全运行的前提之下, 提出了一种融合静态提温增容和动态监测增容的综合方法。对计算导体载流量的摩尔根公式进行了修正, 并通过计算导线弧垂来验证综合增容后的安全性。以 Visual C# 为平台开发了输电线路动态增容分析软件, 并通过实例分析了不同情况下增容方法对导体载流量的影响。算例分析的结果表明, 动态增容方法比静态增容方法的增容空间大, 而将二者结合起来的增容效果更为明显。

关键词: 动态增容; 输电线路; 载流量; 线路弧垂; 允许温度

A method of dynamic rating of ultra high voltage transmission line

Ji Xingquan¹, Du Yanbin¹, Li Kejun², Yuan Mianqi³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corporation, Jinan 250013, China)

Abstract: To fully exploit the potential capacity of EHV transmission lines, an integrated rating approach which combines the static temperature raising method and dynamic monitoring method is proposed which can keep secure operation without changing existing transmission line facilities. The Morgan ampacity formula is revised, and the security of dynamic rating is verified by calculating the sag of transmission line. A dynamic rating tool is developed based on Visual C++. The impact of dynamic rating method upon line ampacity is illustrated by numerical examples in different scenarios. The results demonstrate that dynamic rating of power transmission lines can usually provide a significant increase of transmission capacity compared to the static rating method, and the effect is more obvious when combining the two methods.

This work is supported by Science and Technology Planning Project of Shandong Province (No. 2012G0020503).

Key words: dynamic rating; transmission line; ampacity; line sag; allowable temperature

中图分类号: TM723 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0102-05

0 引言

随着社会用电需求的持续加大, 以及风电、太阳能光伏并网发电等可再生能源发电的迅猛增长, 对现有输电系统的供电能力提出了更高的要求, 而建设新的输电线路不仅投资巨大, 建设周期较长, 而且受环境政策、土地资源等方面的约束也越来越明显。另一方面, 近年来电网的实时监测技术日臻完善, 除传统的 SCADA 系统^[1]外, 广域测量系统(WAMS)^[2]、气象环境测量系统等已发展得较为成熟, 凭借上述监测手段可以获得丰富的电网数据。这

使得实时分析影响输电能力的主要因素、充分挖掘现有的输电潜能成为可能。

目前有多种提高线路输送能力的方法, 如采用同杆多回方式^[3]、紧凑型输电技术^[4]、动态无功补偿技术^[5-6]、柔性交流输电技术(FACTS)^[7]等。但在不改变现有线路结构的前提下, 提高线路的输送容量主要有如下两种方法^[8]。

1) 静态提温增容技术。即突破现行技术规程的规定, 如把导体的最高允许温度由现行的 70 °C 提至 80 °C 或 90 °C, 来增加现有导线的输送容量。但为保证安全性, 采用这种方式应充分论证其对弧垂变化、导体及配套金具的机械强度、使用寿命等方面的影响^[9]。

基金项目: 山东省科技发展计划资助项目(2012G0020503)

2) 动态监测增容技术。现行规程中的额定载流量是以不利的气象条件(环境温度 40 °C、风速 0.5 m/s、日照强度 1 000 W/m²)为假设前提, 根据导体的最高允许温度(70 °C)计算出的理论值。而实际的气象条件大多好于上述设定情况^[10], 因此导线的实际允许载流量和规定载流量之间存在着一定的隐性容量^[11]。动态监测增容就是通过监测的动态环境数据, 实时计算导体的实际允许载流量, 以充分利用输电线路客观存在的隐性容量。

早在 20 世纪 70 年代, 国外就开始了输电线路动态载流量的相关研究, 提出了动态热定值(Dynamic Thermal Rating, DRT) 的概念^[12]。美国电科院开发的动态热容量监测系统(Dynamic Thermal Circuit Rating, DTCR), 能够依据实时负荷数据和监测到的气象资料, 连续计算并实时更新输电线路的动态载流量。美国 EPS 公司研发的输电线路实时定值系统 CAT-1 已在 18 个国家总计 300 多条线路上投入运行。文献[8]分析了线路的不同增容方法对风电场最优建设容量的影响, 结果表明, 相比静态增容方法, 采用动态增容方法可使风电场的最优容量增加至三倍左右。文献[13]基于动态热定值系统, 进一步研究了气象数据的不同处理方式对线路载流量计算精度的影响。国内通常采用的方法是沿线安装小型气象站, 并在导线上安装相关测量装置, 实时收集气象资料和导线拉力、弧垂等状态, 通过计算确定线路载流量^[14]。文献[15]建立了架空导线的暂态热路模型, 并通过阶跃电流加载实验进行了验证。文献[16]综合考虑线路的热稳定限制、电压限制、功角稳定限制三种因素, 提出了一种基于状态估计的线路载荷能力在线计算方法。文献[17]则采用马尔可夫链蒙特卡洛方法对线路增容运行的风险进行了评估, 得到的结论是由线路增容所产生的风险均可控制在 1% 以下, 属于电网运行和调度所能接受的范围。

在现有研究工作的基础上, 本文对导体载流量的数学模型进行了分析和改进, 并将现场试验结果与理论计算结果相对比, 验证该数学模型的正确性。在此基础上提出了将静态提温增容技术和动态监测增容技术相结合的综合方法, 并进行了应用软件的设计。

1 载流量的计算

通常采用摩尔根(Morgan)公式来计算架空线路的允许载流量, 如式(1)所示。

$$I = \sqrt{\frac{W_R + W_F - W_S}{R_{ac}}} \quad (1)$$

式中: R_{ac} 和 I 分别为导线的交流电阻和允许载流

量; W_R 、 W_F 和 W_S 分别为单位长度导线的辐射散热功率、对流散热功率和日照吸热功率。

1.1 日照吸热功率

架空线路吸收太阳辐射的能量会造成导体温度升高, 日照吸热功率 W_S 可表示为

$$W_S = \alpha_s J_s D \quad (2)$$

式中: α_s 为导线表面吸热系数; J_s 为日照强度(W/m²); D 为导线的外径(m)。

1.2 对流散热功率

按方程(3)计算对流散热功率。

$$W_F = k \pi \lambda_f \theta R_c^m \quad (3)$$

式中: k 和 m 为对流散热系数, 按相关设计规程^[18], 取系数 $k=0.57$; $m=0.485$; θ 为导线表面的平均温升(°C); λ_f 为导线表面空气层的传热系数; R_c 为雷诺数, 表示为

$$R_c = v_w D / \nu_f \quad (4)$$

式中: v_w 为垂直于导线的风速; ν_f 为导体表面空气的运动黏度系数。

1.3 导线辐射散热功率

根据斯蒂芬-波尔兹曼定律, 导体向环境辐射的热量与导体和环境绝对温度的四次方差成正比, 具体表示为

$$W_R = \pi s D k_c (T_c^4 - T_0^4) \quad (5)$$

式中: s 为斯蒂芬-波尔兹曼常数; k_c 为导线的表面辐射系数; T_c 和 T_0 分别为导体的稳态温度和环境温度。

1.4 交流电阻

线路导体的交流电阻 R_{ac} 可表达为

$$R_{ac} = \beta R_{dc} \quad (6)$$

式中: β 为交直流电阻比; R_{dc} 为导体的直流电阻(Ω)。 R_{dc} 与导体温度有关, 可进一步表示为

$$R_{dc} = R_{20} [1 + \alpha_1 (T_c - 20)] \quad (7)$$

式中: R_{20} 为导体 20°C 时的直流电阻; α_1 为电阻温度系数。

式(6)中的交直流电阻比 β 可按式(8)计算。

$$\beta = 1 + \frac{\Delta R_1}{R_{dc}} + \frac{\Delta R_2}{R_{dc}} \quad (8)$$

式中: ΔR_1 是由磁滞和涡流所引起的阻值变化; ΔR_2 是由集肤效应所引起的阻值变化。鉴于上述 β 的计算较繁琐, 为便于工程应用, 此处采用了一个实验性结论: 在导体标准截面已知的情况下, 交直流电阻比 β 与载流量 I 满足函数关系: $\beta = \zeta I^\tau$, 其中系数 ζ 和 τ 可通过实验获取。

1.5 导体载流量

将式(6)代入摩尔根式(1), 并计及 $\beta = \zeta I^r$, 可得

$$I = 2 + \sqrt[r]{\frac{W_R + W_F - W_S}{\zeta R_{dc}}} \quad (9)$$

将导线对流散热、辐射散热和日照吸热方程代入式(9)得

$$I = 2 + \sqrt[r]{\frac{0.57\pi\lambda_r\theta R_e^{0.485} + \pi s D k_c (T_c^4 - T_0^4) - \alpha_s J_s D}{\zeta R_{20}[1 + \alpha_t (T_c - 20)]}} \quad (10)$$

2 综合增容方法

由导体载流量的计算式(10)可知, 当导线的外径 D 、电阻 R_{dc} 、系数 ζ 和 τ 等参数已知时, 若能进一步获得环境温度 T_0 、日照强度 J_s 、风速 v_w 等实时气象数据, 则可以根据测量的导线温度 T_c 计算出对应的线路载流量; 也可以根据导线的最高允许温度 T_{max} , 在式(10)中令 $T_c = T_{max}$, 从而计算出当前环境条件下的最大允许载流量, 这也是导线动态增容的出发点。为充分挖掘线路的增容潜力, 本文提出一种静态综合增容方法(简称综合增容方法), 一方面将导线的最高允许温度 T_{max} 作为可变量, 根据电网运行的实际情况灵活设定 T_{max} 的数值; 另一方面通过实时测量导体的环境数据进行动态载流量的计算。同时为保证线路运行的安全性, 对增容方案进行弧垂验证。

时间 t 时的最高允许温度 $T_{max}(t)$ 按式(11)计算。

$$T_{max}(t) = 70 + \frac{I_c(t)}{I_{PM}} \times 20 \quad (^\circ\text{C}) \quad (11)$$

式中: $I_c(t)$ 为时间 t 时的线路载流量测量值; I_{PM} 为线路在环境温度为 40°C 、风速 0.5 m/s 、日照强度 1000 W/m^2 、最高允许温度为 90°C 时的最大允许载流量。这样, 在线路负载水平较高时可自动调高 $T_{max}(t)$ 的取值。

线路增容后, 特别是提高导线的最高允许温度后, 会引起线路弧垂增大, 对地及交叉跨越物的距离减小, 影响线路的安全运行, 因此, 需要对线路增容方案进行弧垂验证。悬链线法和抛物线法是进行弧垂计算的常用方法, 前者能较准确地反映导线的实际受力状态, 但计算复杂; 后者对弧垂的计算能满足工程应用的精度要求, 且计算简单, 因此本文采用抛物线法^[18]进行计算。

图1为综合增容方法的实现流程图, 为便于工程应用, 按一定的增容分析周期将时间划分为不同

的时段, 对每一时段, 首先确定待增容的线路, 读入线路的物理参数, 按式(11)计算最高允许温度 $T_{max}(t)$; 然后收集该时段沿线各数据采集终端上传的环境数据, 包括温度 T_0 、日照强度 J_s 、风速 v_w 等, 按式(10)计算当前允许的载流量和隐性载流量; 对增容后的线路进行弧垂计算和验证, 若验证不合格则按一定级差调低最高允许温度, 重复上述载流量的计算过程, 直到验证合格为止, 输出增容分析的结果。

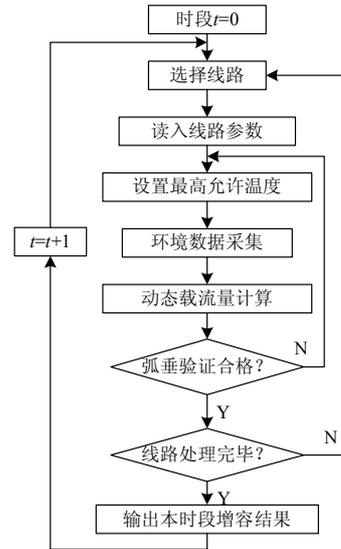


图1 综合增容流程图

Fig. 1 Flow chart of integrated rating method

基于上述综合增容法的原理和流程, 开发了超高压线路动态增容分析系统 UVLDRS, 主站软件以 Visual C# 作为开发平台, 通过 MS SQL Server 实现实时数据和历史数据的管理。图2为 UVLDRS 的功能框图, 该系统可实现历史数据查询、增容计算、弧垂计算与验证等功能。

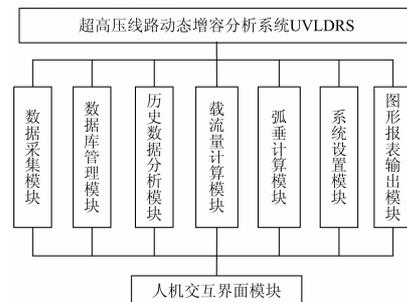


图2 系统功能结构图

Fig. 2 Schematic of the system structure

3 算例分析

3.1 算法验证

为验证上述载流量计算公式的有效性, 对某

LGJ-400/50 型超高压输电线路进行了数据采集和计算, 提取了连续 10 天同一时刻的现场气象数据和线路运行数据, 如图 3 所示。

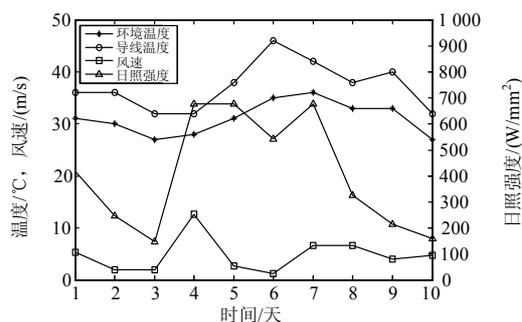


图 3 现场数据曲线
Fig. 3 Field data curve

将测量的导线温度和气象数据输入 UVLDRS 软件, 并将软件输出的载流量计算值与线路的载流量测量值进行了比较, 结果如图 4 所示, 可见计算值与测量值的误差在 5% 以内。

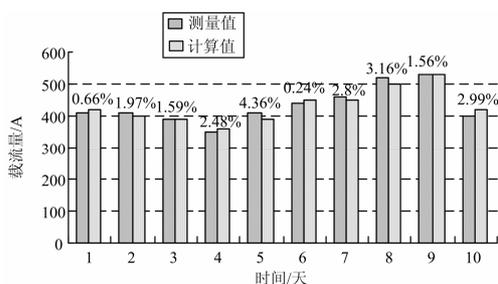


图 4 载流量计算值与测量值的对比
Fig. 4 Comparison of calculated and measured ampacity

3.2 增容结果

仍以上述 LGJ-400/50 型超高压输电线路为例进行增容计算, 该类导线的设计最大允许载流量(即原限值)为 591 A, 而线路的实际载流量如图 5 所示, 二者的最小差值已不足额定载流量的 10%, 需要进行增容分析。

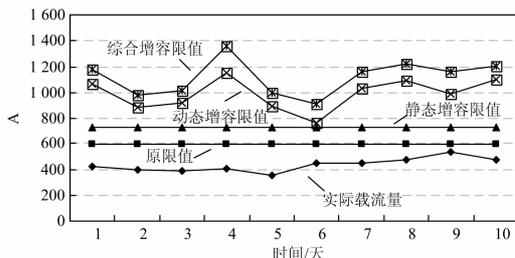


图 5 线路增容曲线
Fig. 5 Line rating curves

按如下三种情况进行增容计算: 1) 静态增容: 只提高导线允许温度至 80 °C, 其他计算参数取设

计规程的指定值^[19]; 2) 常规动态增容: 导线最高允许温度仍取 70 °C 并固定不变, 根据实时采集的气象数据计算允许载流量限值; 3) 综合增容: 按式(11)动态调整最高允许温度, 同时根据实时采集的气象数据计算允许载流量限值, 并按弧垂验证的情况进行修正。三种情况下的增容计算结果如图 5 所示。

由图 5 可见, 三种增容方法均可增加线路的输送容量, 但增容效果有明显区别。静态增容比原限值仅增加 24% 左右, 当线路负荷水平进一步增大时, 可能会因静态增容限值的约束而限制输送容量; 常规动态增容的限值随环境条件的变化而变化, 比静态增容限值提高了 5%~56%; 综合增容的限值又比常规动态增容提高了 9.2%~18.4%, 因而该方法的增容效果最明显, 能有效挖掘输电线路的输送容量。

此外, 由图 5 可知, 根据实际运行环境得出的增容限值波动比较大, 如风速较大时(图中第四组数据), 由于导体对流条件好, 因而计算得到的增容限值明显提高, 说明自然条件对线路载流量的影响不可忽视。

4 结语

本文提出了一种超高压架空输电线路载流量的实用计算方法, 然后将静态提温增容和动态监测增容进行有机地结合, 根据线路的运行情况动态调整最高允许温度, 通过对线路环境参数的实时采集, 动态计算增容限值, 充分挖掘输电线路的潜在输电能力。计算结果表明, 所提出的综合增容方法比现有的静态增容方法和常规动态增容方法的增容空间大, 增容效果明显。

参考文献

- [1] 刘洋, 卢建刚, 黄凯. 电网调度自动化实时信息分析与评估系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 38-42.
LIU Yang, LU Jiangang, HUANG Kai. Research of real-time information analysis and assessment system for power network dispatching automation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 38-42.
- [2] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于多时段同步测量信息的 T 接线路参数在线测量[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 238-244.
NIU Shengsuo, LIANG Zhirui, ZHANG Jianhua, et al. Online measurement of T-connection transmission line parameters based on multi-interval synchronized measurement information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 238-244.
- [3] 柯广, 易灵芝, 周诗霞, 等. 基于双回路交直流同线输电方式的线路增容研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 25-31.

- KE Guang, YI Lingzhi, ZHOU Shixia, et al. Study of capacity-increase for simultaneous AC-DC transmission based on double circuit AC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 25-31.
- [4] 王沅旭, 卢继平, 陈岳. 适用于超高压紧凑型线路的突变量保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 23-33.
WANG Yuankui, LU Jiping, CHEN Yue. A new scheme of variation protection for EHV compact transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 23-33.
- [5] 戴珂, 徐晨, 丁玉峰, 等. 改进型 MMC-STATCOM 的建模及分层控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 44-51.
DAI Ke, XU Chen, DING Yu-feng, et al. Research on modeling and hierarchical control for an improved MMC-STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 44-51.
- [6] 王丰华, 吴剑敏, 金之俭, 等. 考虑系统无功补偿时输电线路的传输容量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 105-109.
WANG Fenghua, WU Jianmin, JIN Zhijian, et al. Transmission capacity analysis of transmission line when considering the reactive power compensation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 105-109.
- [7] 黄柳强, 郭剑波, 卜广全, 等. FACTS 协调控制研究进展及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 138-147.
HUANG Liuqiang, GUO Jianbo, BU Guangquan, et al. Research progress and prospect of FACTS coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 138-147.
- [8] HECKENBERGEROVA J, HOSEK J. Dynamic thermal rating of power transmission lines related to wind energy integration[C] // International Conference on Environment and Electrical Engineering, Italy, 2012.
- [9] 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 Qiping, QIAN Zhiyin. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 18-21.
- [10] DOUGLASS D A, EDRIS A A, PRITCHARD G A. Field application of a dynamic thermal circuit rating method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 823-831.
- [11] MATUS M, SAEZ D, FAVLEY M, et al. Identification of critical spans for monitoring systems in dynamic thermal rating[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 1002-1009.
- [12] DAVIS M W. A new thermal rating approach: the real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines – part I: general description and justification of the real time thermal rating system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(3): 803-809.
- [13] HOSEK J, MUSILEK P, LOZOWSKI E, et al. Effect of time resolution of meteorological inputs on dynamic thermal rating calculations[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(9): 941-947.
- [14] 杨鹏, 房鑫炎. 采用 DTCR 模型提高输电线路输送容量[J]. 华东电力, 2005, 33(3): 11-14.
YANG Peng, FANG Xinyan. Increasing transmission line capacity by DTCR model[J]. East China Electric Power, 2005, 33(3): 11-14.
- [15] 刘刚, 阮班义, 张鸣. 架空导线动态增容的热路法暂态模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 58-62.
LIU Gang, RUAN Banyu, ZHANG Ming. A transient model for overhead transmission line dynamic rating based on thermal circuit method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 58-62.
- [16] 梁立凯, 韩学山, 王艳玲, 等. 输电线路载荷能力在线定值[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 279-284.
LIANG Likai, HAN Xueshan, WANG Yanling, et al. Online valuation of transmission line loadability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 279-284.
- [17] 王孔森, 盛戈皞, 王葵, 等. 输电线路动态增容运行风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 11-15.
WANG Kongsan, SHENG Gehao, WANG Kui, et al. Operation risk assessment of a transmission line dynamic line rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 11-15.
- [18] 杨水丽. 输电线路动态增容监测系统后台软件设计与实现 [D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
YANG Shuili. Research and realization of background soft on dynamic capacity-increase monitoring system of transmission lines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [19] 华东电力设计院. DL/T5092-1999 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.
East China Electric Power Design Institute. DL/T5092-1999 technical code for designing 110~500 kV overhead transmission line[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

收稿日期: 2014-04-26; 修回日期: 2014-05-20

作者简介:

吉兴全(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究; E-mail: xqji@163.com

杜彦镔(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化方面的研究;

李可军(1972-), 男, 教授, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。