

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.022

基于安全性约束和经济性分析的输电线路增容方法研究

高 适¹, 延敏娜¹, 王明伟¹, 楼贤嗣², 章 禹², 郭创新^{2*}

(1. 贵阳供电局, 贵州 贵阳 550002; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对输电线路增容运行过程的安全性和经济性问题,提出基于安全性约束和经济性分析的输电线路增容方法。该输电线路增容方法包括温度校核、故障率校核和经济性分析3个主要步骤。利用热平衡微分方程计算了输电线路实时温度,建立了基于比率故障率模型的输电线路短期可靠性模型,计算了输电线路故障率,基于输电线路抗拉强度损失的经验公式,提出了相对老化速率的计算方法。从输电收益、线路损耗成本和线路寿命损耗成本3个经济性指标,量化描述了输变电线路增容运行的经济收益。研究表明:所提出的输电线路增容方法可以对原始增容方案进行优化,能够实现输电线路增容运行安全性和经济性的平衡;最终得到的增容方案既满足输电线路温度约束和故障率约束,同时具有良好的经济性。

关键词:输电线路;热平衡分析;抗拉强度;比率故障率模型;短期可靠性;相对老化速率

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0927-06

Transmission line rating method based on security constraint and economy analysis

GAO Shi¹, YAN Min-na¹, WANG Ming-wei¹, LOU Xian-si², ZHANG Yu², GUO Chuang-xin²

(1. Guiyang Electric Power Supply Bureau, Guiyang 550002, China;

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the security and economy problem of transmission line rating, a transmission line rating method based on security constraint and economy analysis was proposed. This transmission line rating method consisted of three main steps: temperature verification, failure rate verification and economy analysis. The real-time temperature of transmission line could be calculated by heat balance differential equation. A short-term reliability model of transmission line based on the PHM (proportional hazard model) was presented in this paper. A computing method of relative aging rate of transmission line based on empirical formula of tensile strength loss was proposed. The economy of transmission line rating was described from three terms including transmission profit, transmission loss cost and life loss cost. The results indicate that the proposed transmission line rating method can achieve a balance between security and economy. The final rating plan obtains by the method satisfies the constraints of temperature and failure rate, and it is economical in the meanwhile.

Key words: transmission line; heat balance analysis; tensile strength; proportional hazard model; short-term reliability; relative aging rate

0 引 言

提高现有输电线路的输电能力,对于提高现有电网企业的经济效益具有重大意义。在用电高峰期,输电线路增容运行能够缓和电网建设滞后与高用电量需

求之间的矛盾。但是增容运行会导致输电线路温度升高、故障率上升,加快输电线路的老化失效,甚至停运。因此,输电线路增容运行的安全性和经济性是制定输电线路增容方案时必须考虑的问题。

热平衡方程是研究输电线路增容方法的重要基

收稿日期:2016-11-21

作者简介:高适(1986-),男,贵州贵阳人,主要从事地区电网电力调度管理工作。E-mail:344961830@qq.com

通信联系人:郭创新,男,教授,博士生导师。E-mail:guochuangxin@zju.edu.cn

础,文献[1]和文献[2]分别建立了架空输电线路动态增容的热路法稳态模型和暂态模型,输电线路的暂态热平衡方程是一个微分方程,含有幂函数项,求解较为复杂,线性化的方法存在较大的求解误差;文献[3]提出以 Runge-Kutta 公式为基础的计算模型求解输电线路暂态热平衡方程,可以避免因引入热传递系数带来的误差;相对于通过模型求解输电线路实时温度,文献[4]采用测量导线垂直投影平面内悬挂倾角和风偏角的方法求取导线温度;文献[5]的分析认为制约最大载流量的主要因素是导线的热稳定性,但其根本问题是导线发热后对地、交叉跨越距离减小的问题,该文献深入研究了电力线路行波传输时差、长度和弧垂 3 者之间的关系,提出基于环境参数和弧垂监测的线路动态增容方案;文献[6]针对弧垂变化制约输电线路允许载流量的问题,提出在一定的范围内提高到导线允许温度,只要在设计中补偿其弧垂增加的影响,调整线夹接触传导状态,即可确保线路安全运行;文献[7]考虑超高压线路,通过动态调整输电线路的最高允许温度,提出一种融合静态提温和动态监测增容的综合方法,通过计算导线弧垂来检验综合增容方案的安全性;文献[8]的工作主要集中在对气象数据的预测模型上,利用气象监测参数后验分布的随机序列来建立风速、风向和环境温度的概率分布模型,结合线路负载电流模型利用蒙特卡洛方法每次采样一组气象和负载电流数据,并带入热平衡方程计算线路温度,并给出线路增容运行的风险指标。

本研究提出一种考虑温度约束、故障率约束和经济性的输电线路增容方法。

1 温度约束

架空输电线路长期处于室外运行,线路温度受到环境因素的影响很大。本研究根据暂态热平衡方程计算输电线路的实时温度:

$$mC_p \frac{dT_c}{dt} = Q_j + Q_s - Q_r - Q_c \quad (1)$$

式中: m —输电线路的质量; C_p —线路比热容; T_c —输电线路实时温度; Q_j, Q_s, Q_r, Q_c —输电线路的焦耳产热功率、吸收太阳辐射功率、辐射散热功率和对流散热功率。

m, C_p 是两个影响输电线路暂态和静态热平衡过程的重要指标, Q_j, Q_c, Q_r, Q_s 可通过下式计算:

$$Q_j = I^2 R \quad (2)$$

式中: I —线路电流, R —线路交流电阻。

$$Q_s = E_s A_s D \quad (3)$$

式中: E_s —单位面积太阳辐射功率, A_s —输电线路的

吸收率, D —输电线路直径。

辐射散热的计算基于斯蒂芬—玻尔兹曼定律:

$$Q_r = \pi D \varepsilon \sigma_B [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (4)$$

式中: ε —辐射率, σ_B —斯蒂芬—玻尔兹曼常数, T_a —环境温度。

低风速条件下的强迫对流散热:

$$Q_c = \left[1.01 + 0.371 \left(\frac{D\rho V}{\mu} \right)^{0.52} \right] * K_{\text{angle}} (T_c - T_a) \quad (5)$$

式中: ρ —空气密度, V —风速, μ —空气粘滞系数, K_{angle} —风向角因子。

通常输电线路有一个正常工作温度作为输电线路增容的温度约束。

2 故障率约束

输电线路增容运行对于输电线路可靠性的影响主要有:(1)输电线路实时温度变化对输电线路短期可靠性的影响;(2)输电线路增容运行导致线路抗拉强度的损失,输电线路抗拉强度的损失是输电线路老化失效的主要原因^[9]。

本研究通过比率故障率模型量化实时线路温度对输电线路短期可靠性的影响,通过 MORGAN 提出的经验公式计算输电线路增容运行导致的抗拉强度损失。比率故障率模型(PHM)最早由 COX D R^[10] 提出。PHM 模型假设状态变量对失效函数具有乘法效应,其故障率函数为:

$$h(t) = h_0(t) \exp(\gamma Z(t)) \quad (6)$$

式中: $h_0(t)$ —基准故障率函数, $Z(t)$ —协变量。

本研究应用 Weibull 分布描述线路老化过程,输电线路的实时温度 $T_c(t)$ 和线路正常工作温度 $T_{c,\text{design}}$ 的比值为协变量得到:

$$h(t) = \frac{\beta}{L} \left(\frac{T_c}{L} \right)^{\beta-1} \exp\left(\gamma \frac{T_c(t)}{T_{c,\text{design}}}\right) \quad (7)$$

式中: β, γ —参数; L —线路的设计服役时间; T_c —输电线路等效投入运行时间。

MORGAN 通过大量的实验和数据分析给出了输电线路抗拉强度损失的经验公式:

$$W = W_a \{ 1 - e^{-[A + m \ln t + B * \theta + C * \ln(R/80)]} \} \quad (8)$$

式中: W —输电线路抗拉强度损失百分比; W_a —完全退火情况下输电线路的抗拉强度损失百分比; t —输电线路投入运行时间; θ —该运行时间段内的线路温度; A, m, B, C, R —与导体本身材料属性相关的常数。

本研究假设抗拉强度损失超过 W_{max} 时,输电线路失效,退出运行,代入上式求解线路在温度 θ 下的设计

服役时间:

$$L = e^{\frac{\left\{ \ln \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{W_{\max}}{W_a}} \right] \right\}^{A-B \cdot \theta - C \cdot \ln \left(\frac{R}{80} \right)}{m}} \quad (9)$$

令:

$$Q = e^{\frac{\left\{ \ln \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{W_{\max}}{W_a}} \right] \right\}^{A-C \cdot \ln \left(\frac{R}{80} \right)}{m}} \quad (10)$$

$$P = \frac{B}{m} \quad (11)$$

代入式(9)得到:

$$L = Qe^{-P\theta} \quad (12)$$

本研究确定了最大抗拉强度损失值和线路工作温度,输电线路的设计服役时间为一个固定值。

在线路的实际运行过程中线路温度是实时变化的。线路的参考温度为 θ_0 ,一般选取线路的正常工作温度 $T_{c,\text{design}}$ 为参考温度。假设输电线路在线路温度 θ_i 下运行 t_i 小时所损失的抗拉强度和在线路的参考温度 θ_0 下运行 t_{ei} 时间所损失的抗拉强度相同,则 t_{ei} 为等效运行时间,由式(8)对抗拉强度损失的定义可知:

$$t_{ei} = t_i e^{\frac{B(\theta_i - \theta_0)}{m}} \quad (13)$$

假设输电线路在每个时间段内保持恒定线路温度运行,则总的等效服役时间为:

$$T_e = \sum_{i=1}^n t_i e^{\frac{B(\theta_i - \theta_0)}{m}} \quad (14)$$

将式(12)和式(14)代入式(7),得到输电线路故障率模型:

$$h(t, \theta_0) = \frac{\beta}{Qe^{-P\theta_0}} \left(\frac{T_e}{Qe^{-P\theta_0}} \right)^{\beta-1} \exp \left(\gamma \frac{T_c(t)}{T_{c,\text{design}}} \right) \quad (15)$$

该模型表征了温度对输电线路短期故障率影响和温度对输电线路造成的不可逆的抗拉强度损失。

3 经济性校验

输电线路增容方法也要考虑经济性。输电线路增容运行主要涉及 3 个经济性指标:

(1) 单位时间内的电费收益:

$$r = K \cdot S_N \cdot \cos \varphi \cdot (P_{\text{out}} - P_{\text{in}}) \quad (16)$$

式中: K —线路负载率, S_N —线路容量, $\cos \varphi$ —功率因数, P_{out} —销售电价, P_{in} —上网电价。

(2) 单位时间内的线路损耗成本:

$$c_p = I^2 R \cdot P_{\text{out}} \quad (17)$$

(3) 线路增容运行导致的线路设计服役时间的损失。把线路在 θ_i 下的实际运行时间 t_i 和输电线路在 θ_0 下的等效运行时间 t_{ei} 的比值定义线路的相对老化速率 v ,由式(13)可知:

$$v = e^{\frac{B(\theta_i - \theta_0)}{m}} \quad (18)$$

由上式可知,当线路的温度等于参考温度时,线路的相对老化速率为 1,当线路的温度高于参考温度时,线路的相对老化速率大于 1,并且呈现指数增长关系,在实际运行过程中这种特性将显著的降低线路在高负载率下运行的经济性。单位时间寿命损耗成本定义为:

$$c_{\text{life}} = \frac{v}{L_0} P_{\text{line}} \quad (19)$$

综合 3 个经济性指标得到输电线路单位时间运行利润为:

$$b_{\text{profit}} = r - c_{\text{life}} - c_p \quad (20)$$

4 输电线路增容方法流程

本研究所提出的输电线路增容方法流程图如图 1 所示。

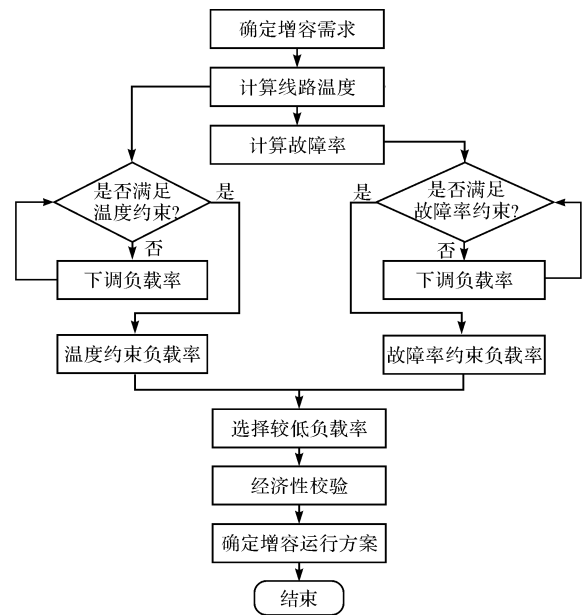


图 1 输电线路增容方法流程图

其中,温度约束校核与故障率约束校核可以互换顺序或同时进行,温度约束和故障率约束是线路增容方案的强制约束条件。经济性校验提供辅助的经济性参考指标。

5 算例分析

本研究设置场景讨论输电线路的增容运行方法。原系统线路 L1 和线路 L2 为负荷 Load 供电,现线路 L2 需要停运检修,检修工作要在上午 8:00 开始,持续 5 h,在该检修时段内,负荷 Load 由单条线路 L1 供电。根据调度部门和监控中心的负荷预测结果,在该时间段内线路 L1 需要以 1.5 倍的负载率运行。本算例选取 L1 为一条参考温度为 70℃,设计服

役时间为81 559 h,等效已服役时间为 50 000 h 的 LGJ-240/40 型钢芯铝绞线。

算例场景如图 2 所示。

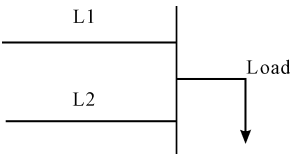


图 2 算例场景

5.1 温度约束校核

本研究假设输电线路 L1 的参考温度为 70 ℃,基于式(1)计算在该参考温度约束下增容持续时间和负载率的关系如图 3 所示。

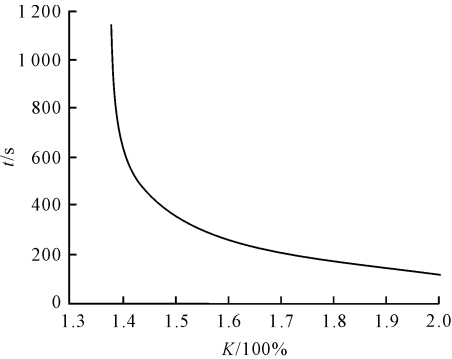


图 3 温度约束下持续时间和负载率的关系

负载率和线路稳态温度的关系如图 4 所示。

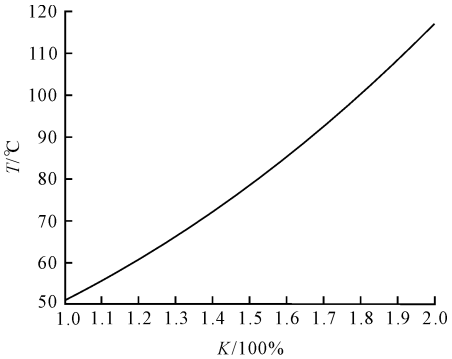


图 4 负载率和输电线路稳态温度的关系

由图 3 可知,在温度约束下输电线路的增容可持续时间随负载率的上升呈现指数形式急剧下降。输电线路在高负载率(≥ 1.5)段的持续运行时间是非常有限的,在分钟时间尺度以内,如果要考察小时时间尺度上的负载率,可以直接计算该负载率对应的稳态运行温度,而忽略其暂态温度变化过程。

由图 4 可知输电线路负载率和线路稳态运行温度之间的关系。线路的稳态运行温度随着负载率的增加平稳上升。1.38 倍的负载率对应的线路稳态运行温

度为参考温度 70 ℃。当线路以 1.38 倍的负载率运行时,持续时间趋于无穷,表示线路可以以该负载率长期运行而不违反温度约束。当输电线路 L1 在 8:00 ~ 13:00 的所需增容时间段内分别以 1.5 倍和 1.38 倍的负载率运行时的线路实时温度如图 5 所示。

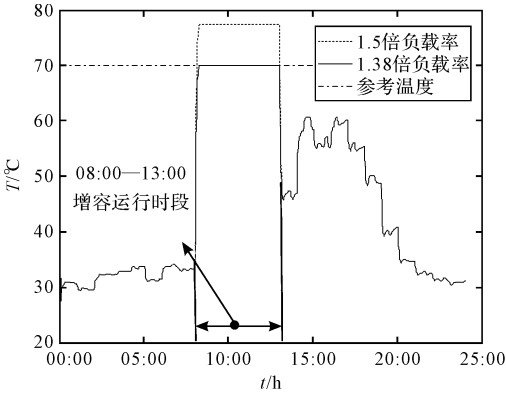


图 5 1.38 倍和 1.5 倍负载率下线路实时温度对比

由图 5 可知,当输电线路 L1 在所需增容时间段内以 1.5 倍负载率运行时,线路将违反温度约束。1.38 倍的负载率为参考温度下的最高允许负载率,线路实时温度的计算结果与图 3、图 4 的结论一致。

5.2 故障率约束校核

本研究基于式(1)可计算负载率对应的输电线路稳态温度,然后利用式(15)可计算该稳态温度所对应的故障率,计算得到输电线路负载率和故障率的对应关系,如图 6 所示。

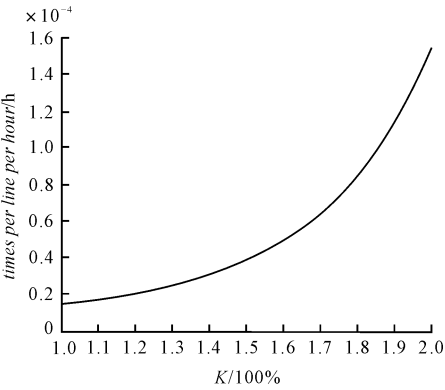


图 6 输电线路负载率和故障率的关系

输电线路的故障率在低负载率区段(≤ 1.5),线路故障主要由老化失效导致因此上升较为缓慢,在高负载率区段(≥ 1.5),线路故障主要由线路过高的实时温度引起,对应故障率模型中包含协变量的指数项,因此呈现指数型上升趋势。

假设输电线路可接受故障率为 4×10^{-5} ,由图 6 可知 1.5 倍负载率的增容需求满足输电线路故障约

束。输电线路 L1 在以 1.5 倍负载率增容运行和不增容运行(若不进行线路 L2 的检修则 L1 不需要增容运行)情况下 L1 线路的故障率变化。对比如图 7 所示。

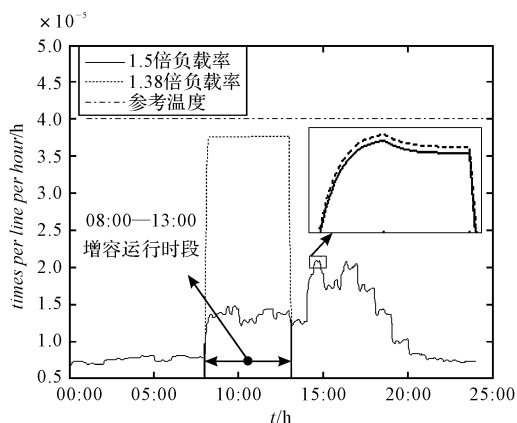


图 7 1.5 倍负载率和不增容运行下输电线路故障率的对比

由图 7 可知,在 1.5 倍负载率下,输电线路故障率满足故障率约束限制。值得注意的是,增容运行将导致输电线路加速老化失效,而这是一个不可逆的过程。

5.3 经济性校验

根据第 2 节关于输电线路增容方法的设定,应该选取同时满足两个约束条件的输电线路负载率,即 1.38 倍。假设上网电价为 0.504 3 元/kWh、销售电价为 0.538 元/kWh。

输电线路的各项经济性指标随负载率的变化情况如图 8 所示。

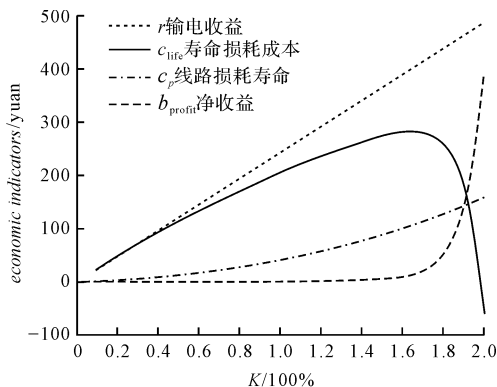


图 8 输电线路经济性指标和负载率的关系

输电线路的输电收益随着负载率的增加而增加,因为在固定电价的情况下,负载率越高线路输送的电能越多,收益越高;线路损耗成本是由输电线路发热引起的,负载率越高,线路电流越大,线路损耗越高;线路寿命损耗成本与负载率呈现指数关系,这是因为在高负载率区段(≥ 1.8),随着负载率的上升输电线路的老化速度呈指数规律上升(式(18)),寿命损耗成本的这种变化趋势极大的制约了输电线路在高负载率区段

的运行经济性。由图 8 可知,输电线路的运行经济性首先随着线路负载率的上升而平稳上升,单位时间收益始终为正,在大约 1.6 倍负载率时达到最大值 280 元,然后随着负载率的继续上升而快速的下降,在大约 1.96 倍负载率以后由于输电线路寿命损失成本的快速增加,线路的单位时间收益变为负值。

经过温度约束校核与故障率约束校核以后得到的输电线路负载率为 1.38,在该负载率下,输电线路单位时间的收益约为 250 元,较为理想。因此最终的线路 L1 的增容方案为以 1.38 倍的负载率运行 5 h。

6 结束语

本研究提出了一种考虑线路温度约束,故障率约束和经济性的输电线路增容方法。对个预想场景下的线路增容需求进行了分析,得到了最终的增容方案,既可以保证线路增容运行的安全,同时具有良好的经济效益。分析还得到了以下结论:

- (1) 在一定的温度约束条件下,线路的可持续运行时间随着线路负载率的上升显著下降,输电线路的短时增容能力较弱;
- (2) 随着负载率的上升输电线路的稳态热平衡温度平稳上升,输电线路稳态温度-负载率曲线可以为线路增容运行决策提供参考;
- (3) 输电线路的短期故障率随着负载率的增加呈现指数增长趋势,过高的负载率(≥ 1.5)将对输电线路的安全稳定运行产生影响;
- (4) 输电线路的增容净收益随着负载率的上升先增加后减少,在大约 1.8 倍负载率时达到最大值,在大约 1.96 倍的负载率以后输电线路的增容运行净收益为负。

参考文献 (References):

- [1] 刘 刚,阮班义,林 杰,等. 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.
- [2] 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.
- [3] 毛先胤,盛戈皞,刘亚东,等. 架空输电线路暂态载流能力的计算和评估[J]. 高压电器,2011,47(1):70-74.
- [4] 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(5):50-52.
- [5] 戴 沅,钟卓颖,邓小康,等. 基于弧垂实时测量的电力线路动态增容方法[J]. 电测与仪表,2015,52(21):68-73.
- [6] 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.
- [7] 吉兴全,杜彦槟,李可军,等. 一种超高压输电线路动态增

容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015(3):102-106.

- [8] 王孔森, 盛戈皞, 王 葵, 等. 输电线路动态增容运行风险评估[C]. 中国电机工程学会电力系统自动化专业委员会三届一次会议暨 2011 学术交流, 南京: 中国电机工程学会, 2012.

- [9] MORGAN VT. Effect of elevated temperature operation on

the tensile strength of overhead conductor [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1996, 11(1):345-352.

- [10] COX D R. Regression models and life-table[J]. **Journal of the Royal Statistical Society**, 1972, 34(2):187-220.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

高 适, 延敏娜, 王明伟, 等. 基于安全性约束和经济性分析的输电线路增容方法研究[J]. 机电工程, 2017, 34(8):927-932.

GAO Shi, YAN Min-na, WANG Ming-wei, et al. Transmission line rating method based on security constraint and economy analysis[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(8):927-932.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 895 页)

4 结束语

本研究利用哈密顿反馈耗散控制方法, 从能量整型的思路出发, 对永磁同步直线电机进行了哈密顿反馈耗散控制器的设计, 实现了 PMLSM 的速度控制和位置控制问题。

本研究首先设计了一个基于能量整型的速度控制器, 针对不同阻尼参数对系统性能的影响, 提出了阻尼参数 PID 自整定的控制想法, 提高了系统的速度响应性能, 并且通过增加位置控制外环, 实现了永磁同步直线电机的位置控制, 该方法物理意义明确, 所设计的控制器, 可以保证系统的稳定性, 同时使得系统具有良好的动态性能。

仿真结果表明, 本研究提出的阻尼参数 PID 自整定哈密顿反馈耗散方法和固定阻尼参数方法相比可以更加提高系统性能, 位置伺服控制可以保证系统的精确性, 使得系统具有更好的动态性和稳定性。

参考文献 (References):

- [1] 陆华才, 徐月同, 杨伟民, 等. 永磁直线同步电机进给系统模糊 PID 控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4):59-63.
- [2] 潘霞远, 刘希喆, 吴 捷, 等. 永磁同步直线电机的鲁棒 PID 控制[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(9):34-38.
- [3] 宋亦旭, 王春洪, 尹文生, 等. 永磁直线同步电动机的自适应学习控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20):151-156.
- [4] 杨俊友, 崔皆凡, 何国锋. 基于空间矢量调制和滑模变结构的永磁直线电机直接推力控制[J]. 电工技术学报,

2007, 22(6):24-29.

- [5] 赵希梅, 郭庆鼎. 永磁直线同步电动机的变增益零相位 H ∞ 鲁棒跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20):132-136.
- [6] 邹积浩, 朱善安. 基于电压预测的直线永磁同步电机直接推力控制[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(12):1262-1266.
- [7] TABUADA, PAPPAS G J. Abstractions of Hamiltonian control systems[J]. **Automatica**, 2003, 39(12):2025-2033.
- [8] RAMACHER U, NACHBAR P. The Hamiltonian approach to neural networks dynamics[J]. **IEEE International Joint Conference on Neural Networks**, 1991(3):1930-1936.
- [9] ORTEGA R, MAREELS I, MASCHKE, et al. Putting energy back in control[J]. **IEEE Control Systems**, 2001, 21(2):18-33.
- [10] CHENG D S, SPURGEON S. Stabilization of Hamiltonian systems with dissipation[J]. **International Journal of Control**, 2001, 74(5):465-473.
- [11] QIU J, ZHAO G Z. Flux adaptive control for PMSM[J]. **Electric Machines and Control**, 2009, 13(6):797-798.
- [12] 刘星桥, 王 燕, 杨志华, 等. 一种永磁同步直线电机端口受控哈密顿系统下的自适应阻尼注入控制方法[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(11):32-36.
- [13] 王成山, 何 伟, 卢小敏. 全自动蝶式圆台扭结包装机研发[J]. 包装与食品机械, 2016(1):70-72.
- [14] 陈 华, 程志平, 支长义, 等. 基于端口受控哈密顿方法的永磁同步直线电机无源控制[J]. 电测与仪表, 2015, 52(15):1-7.
- [15] 谭建明, 刘 华, 张治平. 永磁同步变频离心式冷水机组的研制及性能分析[J]. 流体机械, 2015, 43(7):82-87, 46.

[编辑: 张 豪]