

3-18-2021

Performance Evaluation Method for Load Control System Considering “Two Detailed Rules”

Yinsong Wang

Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Wang Kai

Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Performance Evaluation Method for Load Control System Considering “Two Detailed Rules”

Abstract

Abstract: With the promulgation of the "two detailed rules" of regional power grid, the requirements by power system thermal power units are more and more strict, and has greatly affected their economic development. *In order to combine the performance evaluation theory of multivariable control system with the engineering practice, the covariance index of multivariable control system is improved, and the assessment method of AGC (Automatic Generation Control) is analyzed and summarized. The improved covariance index of load Control system and the economic index based on the "two detailed rules" are proposed, and the comprehensive evaluation of load Control system is made through weighted operation.* Simulation test and field data are used to establish and verify the evaluation method of unit load control system. The results show that the evaluation method is reasonable and effective.

Keywords

“two detailed rules”, performance evaluation, load control system, covariance index, economic index

Recommended Citation

Wang Yinsong, Wang Kai. Performance Evaluation Method for Load Control System Considering “Two Detailed Rules”[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 710-720.

考虑“两个细则”的负荷控制系统性能评价方法

王印松, 王恺

(华北电力大学 自动化系, 河北 保定 071003)

摘要: 随着各区域电网“两个细则”的颁布, 电力系统对火电机组的要求越发严格, 使火电机组受到了很大的经济影响。为了使多变量控制系统性能评价理论和工程实际相结合, 研究改进了多变量系统的协方差评价指标, 并对“两个细则”AGC (Automatic Generation Control) 的考核方式进行了分析和总结, 提出了负荷控制系统改进的协方差指标和基于“两个细则”的经济性指标, 通过加权运算来对负荷控制系统做出综合评估。利用仿真试验及现场数据, 进行机组负荷控制系统评价方法的确立和验证, 结果表明评价方法合理、有效。

关键词: “两个细则”; 性能评价; 负荷控制系统; 协方差指标; 经济性指标

中图分类号: TM621;TP202;TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 03-0710-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0594

Performance Evaluation Method for Load Control System Considering
“Two Detailed Rules”

Wang Yinsong, Wang Kai

(Automation Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With the promulgation of the "two detailed rules" of regional power grid, the requirements by power system thermal power units are more and more strict, and has greatly affected their economic development. In order to combine the performance evaluation theory of multivariable control system with the engineering practice, the covariance index of multivariable control system is improved, and the assessment method of AGC (Automatic Generation Control) is analyzed and summarized. The improved covariance index of load Control system and the economic index based on the "two detailed rules" are proposed, and the comprehensive evaluation of load Control system is made through weighted operation. Simulation test and field data are used to establish and verify the evaluation method of unit load control system. The results show that the evaluation method is reasonable and effective.

Keywords: “two detailed rules”; performance evaluation; load control system; covariance index; economic index

引言

随着我国大规模可再生能源电力的并网, 电力系统的结构发生了很大的变化。为了提高可再生能源的消纳比例, 调度中心对火电机组的负荷响应速度提出了严格的要求。为了调动各火力发电机组参与辅助服务的积极性, 国家能源局配合地方电监机

构, 提出了“两个细则”。

在国内各个区域, “两个细则”已经形成了成熟的经济考核体系, 其中对火电机组负荷控制系统进行的AGC考核, 深刻的影响着火电机组的经济效益。目前火电机组的运行人员, 只能通过单方面的网(省)调侧的考核结算数据, 来对自身的负荷控

收稿日期: 2019-11-15 修回日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61533013)

第一作者: 王印松(1967-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为先进控制理论及应用、新能源发电自动化技术与系统等。E-mail: 805538000@qq.com

制系统进行评估, 从而无法及时的对系统做出与“两个细则”要求相适应的调整, 造成负荷控制系统在长久的运行中受到了强烈的经济制约。因此, 为了使火电机组的负荷控制满足电力系统对其提出的各项要求, 对负荷控制系统做出合理的性能评价是十分必要的。

负荷控制系统为典型的多输入-多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)控制系统。针对多变量控制系统已提出了较多的性能评价方法, 如文献[1-2]提出的最小方差控制评估方法, 文献[3]将由数据构成的子空间用于多变量回路的性能评估方法等。目前多变量控制系统的性能评价理论, 都是基于类似文献进行了不断深入的研究, 得到了许多成果。随着多变量控制系统评价理论的研究发展, 文献[4]将多变量控制系统的协方差评价方法运用到了负荷控制系统, 使得协方差评价法在负荷控制系统性能评价中得到了初步运用, 提供了一个良好的负荷控制系统的性能评价方法。但是, 对于参与辅助服务的火电机组而言, 这些方法依然很难适应工程实际需求, 评价的结果始终无法体现负荷控制系统对电力能源结构的适应能力。随着“两个细则”对火电机组的经济性影响越发深重, 多变量控制系统的性能评价理论很难为负荷控制系统面临的经济考核问题做出贡献, 学术理论成果和电力系统的要求存在偏离, 成为了系统性能评价理论面临的主要矛盾。

负荷控制系统对于电力能源结构的适应能力, 虽然可以通过机组所受“两个细则”考核的经济性进行体现, 但是不能够作为唯一的衡量标准。发电机组的稳定性和安全性, 是维持电力系统安全运行的基础保证。由于协方差指标以基准时段的数据作为评价基准, 结果能够对监测时段的数据做出合理的评判并给出系统的调整方向, 始终能够保证系统运行的安全性。相比于同样需要基准时段数据作为指标结果支撑的评价方法, 协方差指标使得系统的调整风险大大减小。对于需要在经济性方面做出调整的火电机组负荷控制

系统, 协方差指标更适宜作为运行系统的基础性指标。但是如果按照文献[4]选取的主蒸汽压力和实发功率构造的协方差矩阵进行系统评价, 无法体现火电机组负荷跟随调度指令的能力, 无法和系统经济性进行有效结合, 为负荷控制系统做出综合的性能评价带来了较大困难。

因此, 经过对负荷控制系统协方差评价理论的进一步研究, 本文在文献[4]的基础上对协方差指标进行了改进。针对参与辅助服务的负荷控制系统, 充分利用协方差矩阵的特性来对机组功率跟随调度指令值的控制过程进行评价, 提出了改进的协方差指标。通过细致分析不同区域电网“两个细则”的 AGC 考核指标, 总结规律, 提出了基于“两个细则”的经济性指标。将改进后的协方差指标和经济性指标进行结合, 得到负荷控制系统的综合性能指标, 对火电机组负荷控制系统做出综合性能评价。

1 负荷控制系统性能评价方法

1.1 改进的协方差指标 I_v

在多变量控制系统性能评价的研究历程中, 文献[5]提出了协方差指标的定义式(1)。

$$I_v = \frac{|f_{\text{cov}}(y_M)|}{|f_{\text{cov}}(y_B)|} \quad (1)$$

式中: $|f_{\text{cov}}(y)|$ 为多维数据 y 的协方差矩阵行列式; M, B 分别表示监测时段与基准时段。文献[4]将该方法运用到了负荷控制系统的性能评价当中, 通过构造主蒸汽压力和实发功率间的协方差矩阵来对系统做性能评估, 并通过求取协方差矩阵的广义特征值, 以广义特征值的角度对负荷控制系统协方差指标的计算结果进行了分析和总结, 使得协方差指标在负荷控制系统的评价中得到了正确运用。广义特征值对于分析多变量控制系统尤为重要, 为分析系统的多维数据带来了简便方法。但是, 文献[4]选取的主蒸汽压力和实发功率为二维变量, 构造的协方差矩阵为二维矩阵。经过对负荷控制系统协方差指标的进一步细致研究后, 本文认为二维协方差

矩阵可以直接利用矩阵元素对指标结果进行计算和分析,如果选取合适的二维变量(如系统被调量和设定值),协方差矩阵的数学特性能够得到更充分的利用,且当监测时段和基准时段的数据没有呈倍率关系时,可无需再利用广义特征值进行协方差指标的求取。

二维变量的协方差矩阵的元素,为各自变量的方差(主对角线)和变量间的协方差(副对角线)。由于方差能够描述数据的稳定程度,协方差能够描述二维变量的同向关系,且矩阵中方差越小则表明变量的稳定性更好,协方差越大则表明变量的同向程度越好。根据这一特点,本文将构成协方差矩阵的二维变量,选取为实发功率与指令数值^[8]。

$$I_v = \frac{|f_{\text{cov}}(y_M)|}{|f_{\text{cov}}(y_B)|} = \frac{|f_{\text{Cov}}(N_{eM}, N_{0M})|}{|f_{\text{Cov}}(N_{eB}, N_{0B})|}, \quad (2)$$

式中: N_{eM} , N_{0M} 为监测时段的实发功率与指令数值; N_{eB} , N_{0B} 为基准时段的实发功率与指令数值。

因为协方差矩阵存在半正定特性,且实发功率和指令值存在偏差,所以式(2)中分子和分母 >0 。根据 I_v 数值的大小,可以定性得知:

(1) 当 I_v 明显大于 $1(I_v > 1.25)$, 造成该结果的可能原因有 2 个:

1) 相比于基准时段,监测时段的功率方差更大,系统稳定性更差。

2) 相比于基准时段,监测时段的协方差更小,实发功率和指令的同向程度更差,数值偏离严重。

结论: 监测时段的系统性能比基准时段的差,通过重新调节控制器或设备参数,控制系统的性能具有提高的空间;

(2) 若 I_v 明显小于 $1(I_v < 0.75)$, 造成该结果的可能原因有 2 个:

1) 相比于基准时段,监测时段的功率方差更小,系统稳定性更好。

2) 相比于基准时段,监测时段的协方差更大,实发功率和指令的同向程度更好,功率能够密切跟随指令数值。

结论: 监测时段的系统性能优于基准时段;

(3) 若 I_v 的值接近 1, 说明监测时段的总体性能与基准时段相似,未发生明显的变化。

综上 3 点可知,改进的协方差指标可以对负荷控制系统的功率进行初步评价。为了更好的对系统做出综合性评估,本文在协方差指标的基础上引入了经济性指标。

1.2 基于“两个细则”的经济性指标 I_k

“两个细则”^[9]对火电机组负荷控制系统进行的 AGC 指标考核一般包括 3 个方面: 调节速率、响应时间以及调节精度。因为在个别电网响应时间不作为性能考核指标,为了评价方法不失一般性,对于接受 AGC 考核的负荷控制系统,本文将响应时间和调节速率作为整体进行考量^[10], 即在每个负荷测速段中,从实发功率数值发生变化开始就计算负荷调节速率指标,不再将实发功率跨过调节死区值的响应时间作为单独的考核指标。因此,本文在调节速率指标的计算方法中,包含着对响应时间这一指标的要求(响应时间越慢,则该段的调节速率指标越差)。指标的计算思路可以由华东电网和华北电网的速率、精度考核公式为例进行介绍,见表 1。

表 1 华东电网和华北电网的速率、精度考核公式表

Tab. 1 Speed and accuracy assessment formula of East China power grid and North China power grid

项目	华东电网电量	华北电网电量	考核指标
速率	$Q_{AGC} = \begin{cases} (1 - K_{\text{速率}}) P_N t \alpha_{AGC}; & K_{\text{速率}} < 1 \\ 0; & K_{\text{速率}} \geq 1 \end{cases}$	$Q_{AGC} = \begin{cases} (1 - K_{\text{速率}}) P_N t \alpha_{K1}, & K_{\text{速率}} < 1 \\ 0, & K_{\text{速率}} \geq 1 \end{cases}$	$K_{\text{速率}} = \frac{V_{\text{实测}}}{V_{\text{基本}}}$
精度	$Q_{AGC} = 0.1 \alpha_{AGC} \left \int_0^T (P_{\text{实际}} - P_{\text{目标}}) dt \right $	$Q_{AGC} = \begin{cases} (1 - K_{\text{精度}}) P_N t \alpha_{K2}, & K_{\text{精度}} < 1 \\ 0, & K_{\text{精度}} \geq 1 \end{cases}$	$K_{\text{精度}} = 2 - \frac{\Delta P}{\text{调节允许偏差}}$

通过表 1 可知, 华东电网与华北电网速率考核的方式较为相似, 单次的速率考核电量 Q_{AGC} 均是由算式 $(1-K_{\text{速率}})$ 计算得到的。 $(1-K_{\text{速率}})$ 数值越大, 机组该次受到的考核电量 Q_{AGC} 就越多, 机组的经济性就会越差。 $(1-K_{\text{速率}})$ 算式的性质以及数值量级均和协方差指标相似。

在精度考核方面, 华北电网的精度考核电量 Q_{AGC} 由 $K_{\text{精度}}$ 系数确定, 该系数由 ΔP (偏差积分) 计算得到, 见式(3):

$$\Delta P = \frac{\int_{T_{Si,j}}^{T_{Ei,j}} |P_{\text{实际}}(t) - P_{\text{目标}}(t)| dt}{T_{Ei,j} - T_{Si,j}}, \quad (3)$$

结合表 1 精度考核项进行分析可知, 式(3)不仅能够求取华北电网的 $K_{\text{精度}}$ 系数, 在改变积分限后, 同样可以计算华东电网的积分电量。式(3)的数值越大, 机组受到的考核电量 Q_{AGC} 就会越多, 经济性就越差。只要对该式的计算结果进行适当的放缩, 便可以得到和协方差指标类似的性质和数值量级。

综上所述, 本文根据“两个细则”对火电机组负荷控制系统 AGC 考核的规律, 定义基于“两个细则”的负荷控制系统经济性指标 I_k , 见式(4):

$$I_k = \lambda_{11} K_1 + \lambda_{22} K_2, \quad (4)$$

式中: K_1 为机组 AGC 平均调节速率指标; K_2 为调节精度指标; λ_{11} 和 λ_{22} 为权重系数。对于接受“两个细则” AGC 考核的机组, 速率指标和精度指标均会对机组的经济性产生影响, 在计算经济性指标时不应考核指标的权重有所偏重, 因此本文 λ_{11} 和 λ_{22} 的数值均为 0.5。

调节速率指标 K_1 的计算方式:

$$K_1 = 1 - K_{\text{速率}} = 1 - \frac{V_{\text{实测}}}{V_{\text{基本}}}, \quad (5)$$

式中: K_1 为机组 AGC 平均调节速率系数, 当 $K_1 < 0$ 时, 按 $K_1 = 0$ 处理; $V_{\text{实测}}$ 为机组实测 AGC 调节速率; $V_{\text{基本}}$ 为机组基本响应速率, 在“两个细则”中该数值取决于机组的制粉系统类别。为不失一般性, 将基本速率数值定为 10 MW/min; 机组实测速率 $V_{\text{基本}}$:

$$V_{\text{实测}} = \alpha \cdot \frac{\Delta N}{T}, \quad (6)$$

式中: ΔN 为 AGC 负荷测试指令的变化量; T 为机组实际负荷到达 AGC 测试负荷指令目标值死区范围 ($\pm 1\%$) 内的时间; α 为单位转化系数, 该值和 T 值的单位有关, 将 $V_{\text{实测}}$ 的单位转化为 MW/min。即当 T 的单位为 s 时, α 为 60。

在进行速率指标计算时, 如果选取的数据仅有一段升或降负荷情况时, 调节速率可正常计算。如若选取的数据有多段升或降负荷时, 将分别计算各段升、降负荷期间的调节速率, 求其平均值来作为该段的调节速率。

调节精度指标 K_2 的计算方式为

$$K_2 = \beta \cdot \frac{\int_0^T |P_{\text{实际}}(t) - P_{\text{目标}}(t)| dt}{T}, \quad (7)$$

式中: T 为 1 min, K_2 为调节精度指标; $P_{\text{实际}}(t)$ 为 AGC 作用后机组实际出力; $P_{\text{目标}}(t)$ 为 AGC 作用后机组目标出力; 本文的调节精度的计算时间 T 为 AGC 的投入时间; β 为精度放缩系数。由于积分运算的周期时间为 1min, T 值为系统投入 AGC 的整段时间, β 值可将 K_2 的数值量级放缩为 K_1 的量级, 确保经济性指标的权重计算正确。结合式(3)可知, 式(7)实则是改变了积分限。若在 AGC 投入的整段时间内功率精度偏差越小, 则精度考核项的经济性会越好。

当 K_1, K_2 越小时, 在“两个细则”中其相应的考核电量便会越少, 经济性越好; 当 K_1, K_2 接近 1 时, 相应的性能指标考核的电量越多, 经济性越差。由此根据式(4)可得经济性指标的性质:

(1) I_k 明显小于 1 ($I_k < 0.48$), 表示系统的经济性越好;

(2) I_k 越接近 1 ($I_k > 0.62$), 表示系统的经济性越差。

1.3 负荷控制系统综合指标 I

结合改进的协方差指标与“两个细则”经济性指标, 定义综合指标 I :

$$I = \lambda_1 I_v + \lambda_2 I_k, \quad (8)$$

式中: λ_1, λ_2 为权重系数, 数值之和为 1。

λ_1 , λ_2 数值的选取和机组的运行情况相关。当系统基准时段的安全性、稳定性较好, 需要在经济性方面对系统做出评价和调整时, 协方差指标的权重值 λ_1 可适当减少, 综合指标主要体现机组运行的经济性。当系统基准时段的安全性、稳定性较差时, 再去考虑系统的经济性是不合理的, 经济性指标的权重值 λ_2 需要适当减少, 综合指标的结果以体现机组运行的安全性为主。如果需要对系统安全性和经济性的评价做出平衡, λ_1 , λ_2 的数值应当尽量接近。本文经过多次试验, 给出负荷控制系统综合指标权重系数的选取准则见表 2。

表 2 负荷控制系统综合指标权重系数选取准则
Tab. 2 Selection criterion of weight coefficient of comprehensive index of load control system

条件	λ_1	λ_2
1	0.18	0.82
2	0.28	0.72
3	0.41	0.59
4	0.50	0.50
5	0.63	0.37
6	0.85	0.15

针对权重系数选取准则的说明如下:

条件 1: 本条件下的权重系数 λ_1 和 λ_2 适用于仿真试验的负荷控制系统。仿真试验建立的负荷控制系统在整定 PID 参数时, 系统的安全性和稳定性是基础保证。一般仿真试验的负荷控制系统的运行过程较为理想, 综合指标主要体现仿真负荷控制系统的经济性, 此时 $\lambda_1 \ll \lambda_2$ 。试验表明, 当 $\lambda_1=0.18$, $\lambda_2=0.82$ 时, 多组 PID 参数下仿真负荷控制系统综合指标的对比明显, 能够较好的体现系统的经济性评价需求。

条件 2: 本条件下的权重系数 λ_1 和 λ_2 适用于需要在经济性方面做出调整的现场机组。对于投入 AGC 的火电机组, 系统的安全性和稳定性需要作为评价基础。相比于仿真的负荷控制系统, 系统运行安全性的权重 λ_1 需要适当增加, 但依旧会以评

价“两个细则”为系统带来的经济性效益影响为主要偏重。试验表明当 $\lambda_1=0.28$ 、 $\lambda_2=0.72$ 时, 多组负荷控制系统的现场数据其综合指标的结果对比明显, 能够以系统的运行安全性为基础, 较好的体现系统的经济性评价需求。

条件 3: 本条件下的权重系数 λ_1 , λ_2 适用于在经济性方面已经较为出色的负荷控制系统。由于系统在“两个细则”考核中的经济性已经较好, 此时应当适当增加 λ_1 的权重, 体现系统安全性和稳定性。综合指标能够以系统的运行安全性为基础, 较好的体现系统的经济性评价需求。试验表明当 $\lambda_1=0.41$, $\lambda_2=0.59$ 时, 多组负荷控制系统的现场数据其综合指标的结果对比明显。

条件 4: 本条件下的权重系数 λ_1 , λ_2 适用于需要在安全性和经济性方面做出平衡的负荷控制系统。安全性和经济性均作为系统重要的评价指标。

条件 5: 本条件下的权重系数 λ_1 , λ_2 适用于需要在安全性方面做出评价和调整的负荷控制系统。此时负荷控制系统运行安全性的权重有所增加, 首先要对系统进行稳定性、安全性方面的评价。但是由于系统依旧需要参与电力系统给予的负荷调节任务, “两个细则”带来的经济性权重不应过小。试验表明当 $\lambda_1=0.63$, $\lambda_2=0.37$ 时, 多组 PID 参数下仿真负荷控制系统综合指标的对比明显, 不仅能较好的体现系统的安全性评价需求, 又能体现系统适应电力系统需求的能力。

条件 6: 本条件下的权重系数 λ_1 , λ_2 适用于安全性较差的负荷控制系统。对于该负荷控制系统, 其首要任务应当是保证自身系统运行的安全性, 确保电力系统的工作能够正常进行。综合指标主要体现负荷控制系统的安全性, 经济性的权重较少。

结合权重系数选取准则表 2, 本文对仿真、现场的负荷控制系统经过了多次验证。最终, 给出负荷控制系统综合性能评判准则表 3。

表 3 负荷控制系统综合性能评判准则表
Tab. 3 Comprehensive performance evaluation criteria for load control system

计算结果	评判结果
$0 < I < 0.37$	优
$0.37 \leq I < 0.53$	良
I 接近 1 (I_v 明显小于 1)	中
I 接近 1 (I_v 接近 1)	中
I 接近 1 (I_v 明显大于 1)	差
I 明显大于 1	差

针对评判准则的说明如下:

(1) 当 I 明显小于 1, 即 $0 < I < 0.37$, 说明监测时段的系统在安全稳定运行的前提下, 经济性十分优秀。

结论: 相比于基准时段, 监测时段的综合性能评估结果为优。

(2) 当 $0.37 \leq I < 0.53$ 时, 说明监测时段的系统在运行中性能较好, 经济性较为良好。

结论: 相比于基准时段, 监测时段的综合性能评估结果为良。

(3) 当 I 接近 1 时, 根据 I_v 有以下判断条件:

1) 若 I_v 明显小于 1, 说明在系统稳定安全性方面, 监测时段优于基准时段, 但是经济性差。

结论: 相比于基准时段, 监测时段的综合性能评估结果为中。

2) 若 I_v 接近 1, 说明在系统稳定安全性方面, 监测时段和基准时段相近。经济性适中, 长久运行难以保证经济效益。

结论: 相比于基准时段, 监测时段的综合性能评估结果为中。

3) 若 I_v 明显大于 1, 说明在系统稳定安全性方面, 监测时段差于基准时段, 此时即使经济性良好, 在长久运行中也会伴有安全隐患。

结论: 相比于基准时段, 监测时段的综合性能评估结果为差。

(4) 当 I 明显大于 1 时, 说明系统的安全性、稳定性、经济性很差, 监测时段差于基准时段。

结论: 相比于基准时段, 监测时段的综合性能评估结果为差。

(5) 对于不参与 AGC 调节的机组, 利用协方差指标进行性能评价即可。

2 仿真试验

由于火电厂单元机组越来越频繁地被要求参与到电网的调峰调频, 所以对负荷指令的跟踪能力已经成为电厂运行水平高低的重要指标^[12]。在此背景下, 文献[12]对超临界机组负荷控制系统的对象参数进行了系统辨识。因此本负荷控制系统仿真试验的对象参考了文献[12]中超临界机组的控制系统对象。

负荷控制系统存在众多的控制结构, 许多研究者为此提出了各种控制方案。由于负荷控制系统炉侧和机侧之间的前馈作用以及压力拉回环节和 PD 控制相似, 均类似于一个超前滞后函数或者带有死区的超前滞后函数。因此这些控制方案均可以由文献[4]中建立的控制结构进行归结。该结构如图 1 所示, 其中 $C_{12}(s)$ 和 $C_{21}(s)$ 一般为 PD 控制器的传递函数(前馈), $C_{11}(s)$ 和 $C_{22}(s)$ 一般为 PI 或 PID 控制器的传递函数。

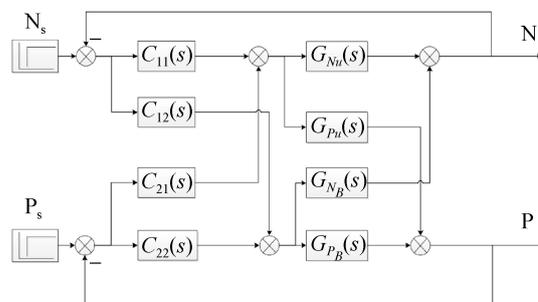


图 1 超临界机组负荷控制系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of supercritical unit load control system

仿真试验的单元机组的传递函数如下:

$$G_{N\mu}(s) = \frac{0.0321(9146.6s+1)}{(22.5594s+1)(24.6563s+1)}$$

$$G_{N\beta}(s) = \frac{2.4369}{(140.0384s+1)(165.1647s+1)} e^{-10.7043s}$$

$$G_{P\mu}(s) = \frac{-0.1587}{(7.8158s+1)(12.5796s+1)}$$

$$G_{P\beta}(s) = \frac{0.0814}{(171.8793s+1)(171.5735s+1)} e^{-12.3956s}$$

定义控制器参数矩阵为

$$K_{AGC} = \begin{bmatrix} C_{11}(s) & C_{21}(s) \\ C_{12}(s) & C_{22}(s) \end{bmatrix}$$

仿真试验设置了 5 组不同的控制器参数，分别为：

$$K_{AGC1} = \begin{bmatrix} 0.012 + 0.006 \frac{1}{s} & 0.0855 + \frac{2s}{10+s} \\ 0.086 + \frac{2s}{10+s} & 42.5 + \frac{0.0685}{s} + \frac{5606.05s}{1+10.52s} \end{bmatrix},$$

$$K_{AGC2} = \begin{bmatrix} 0.08 + 0.05 \frac{1}{s} & 0.05 + \frac{0.4s}{1+0.067s} \\ 0.71 + \frac{0.62s}{1+0.0833s} & 40 + \frac{0.05}{s} + \frac{5600s}{1+10.1s} \end{bmatrix},$$

$$K_{AGC3} = \begin{bmatrix} 0.08 + 0.023 \frac{1}{s} & 0.06 + \frac{0.8s}{1+0.082s} \\ 0.075 + \frac{0.32s}{1+0.056s} & 30 + \frac{0.08}{s} + \frac{5000s}{1+12.5s} \end{bmatrix},$$

$$K_{AGC4} = \begin{bmatrix} 0.02 + 0.01 \frac{1}{s} & 0.09 + \frac{0.62s}{1+0.043s} \\ 0.062 + \frac{0.195s}{1+0.0704s} & 38 + \frac{0.08}{s} + \frac{4823s}{1+10s} \end{bmatrix},$$

$$K_{AGC5} = \begin{bmatrix} 0.05 + 0.008 \frac{1}{s} & 0.098 + \frac{0.52s}{1+0.067s} \\ 0.952 + \frac{0.324s}{1+0.067s} & 38 + \frac{0.05}{s} + \frac{5100s}{1+10s} \end{bmatrix}.$$

仿真过程：定压运行方式，主蒸汽压力指令数值为 24.2 MPa，机组负荷由 580 MW 升至 590 MW。功率和主蒸汽压力的仿真结果分别如图 2、3 所示。

超临界机组需要快速跟踪调度负荷指令的变化，由于锅炉自身的延迟和惯性，会使主蒸汽压力产生较大波动。负荷快速上升时，主蒸汽压力会先呈现出下降的趋势，随着机组的运行逐渐回升。由图 2~3 的结果可知，功率和主蒸汽压力的变化过程符合实际，且功率能够及时跟随指令变化，主蒸汽压力的变化幅值较小，5 组控制器参数均能够保证

机组安全运行。仿真试验结果合理有效。

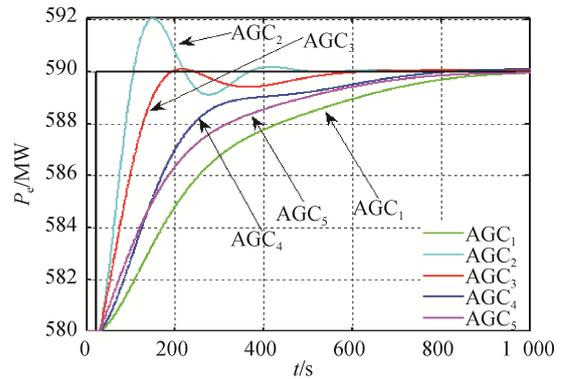


图 2 5 组控制器参数下功率的仿真结果
Fig. 2 Simulation results of power under five controller parameters

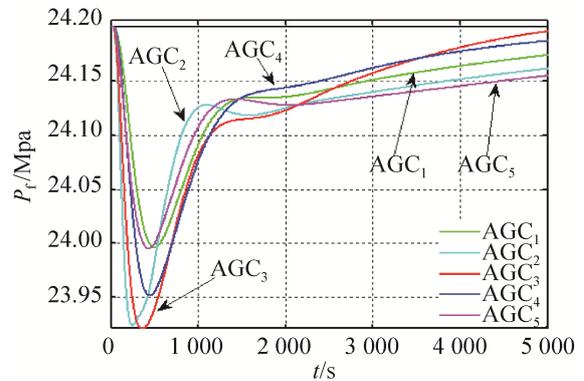


图 3 5 组控制器参数下主蒸汽压力的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of main steam pressure under five controller parameters

现对 5 组控制器参数下的功率数据进行相关指标的计算。

2.1 指标计算

取第 4 组 AGC₄ 的数据作为基准数据，计算其余各组的协方差指标和经济性指标，得到的性能指标计算结果见表 4。

表 4 负荷控制系统仿真试验性能指标计算结果
Tab. 4 Simulation test results of load control system

组别	协方差指标 I_v	经济性指标 I_k
AGC ₁	1.378 2	0.666 0
AGC ₂	0.519 8	0.168 8
AGC ₃	0.603 9	0.340 2
AGC ₄	/	0.557 4
AGC ₅	0.999 3	0.605 4

2.2 负荷控制系统综合评估

将第 4 组作为基准时段, 进行仿真试验数据的综合指标计算, 结果列为表 5。由于本负荷控制系统为仿真系统, 综合指标的权重系数选取准则满足条件 1。

表 5 负荷控制系统仿真试验综合指标计算结果
Tab. 5 Calculation results of comprehensive index of load control system simulation test

组别	综合指标 I	综合评估结果
AGC ₁	0.794 1	差
AGC ₂	0.232 0	优
AGC ₃	0.387 7	良
AGC ₅	0.676 3	中

结合表 3 的评判准则可知, 相比于基准时段第 4 组:

(1) 第 1 组数据的协方差指标已经差于第 4 组, 系统的准确性、快速性以及稳定性等方面无法达到基准要求, 在长久运行中会伴有安全隐患; 综合评估结果为差, 控制器参数还需要做出进一步的调整。

(2) 第 2 组数据协方差指标、经济性指标结果理想, 说明该时段机组能够稳定、安全运行, 经济性优秀; 综合评估结果为优。

(3) 第 3 组数据协方差指标、经济性指标较为良好, 说明该时段在保证机组稳定、安全运行的同时, 基本能够良好的维持经济效益; 综合评估结果为良。

(4) 第 5 组数据在协方差指标方面相近于第 4 组, 但是在“两个细则”的速率考核中会受到较强的经济制约; 综合评估结果为中, 控制器参数还需要进一步做出调整。

根据仿真试验的结果可知, 协方差指标和经济性指标客观、有效, 对各组的综合评估符合实际, 能够为仿真的负荷控制系统做出正确评价。

3 现场数据验证

现场数据选取了华东电网某 1 000MW 超超临

界火电机组和河北电网某 350 MW 超临界火电机组负荷控制系统的运行数据。

3.1 某 1 000 MW 超超临界机组负荷控制系统的性能评估

选取华东电网某超超临界机组负荷控制系统的实发功率跟随各自的 AGC 指令在 2 h 内的运行数据, 共为 5 组数据, 如图 4 所示。

数据的采样间隔为 1 s, 时间分别为
AGC₁:2019-03-04T23:28:23~2019-03-05T01:28:22;
AGC₂:2019-03-05T01:28:23~2019-03-05T03:28:22;
AGC₃:2019-03-05T16:08:23~2019-03-05T18:08:22;
AGC₄:2019-03-06T08:48:23~2019-03-06T10:48:22;
AGC₅:2019-03-06T05:25:02~2019-03-06T07:25:01。

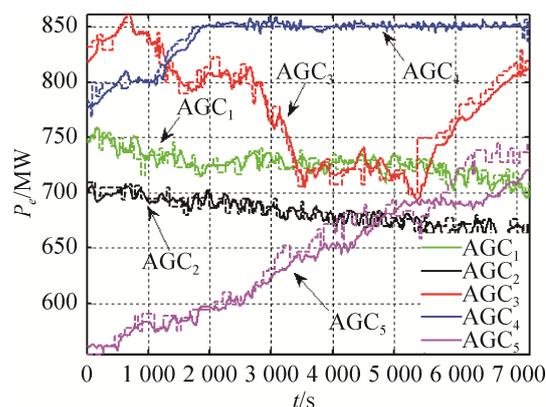


图 4 选取的超超临界机组的 5 组 AGC 运行数据
Fig. 4 Five sets of AGC operation data of an ultra-supercritical unit

3.1.1 性能指标的计算

在经济性指标的计算方面, 以图 5 第 3 组数据的计算为例, 对于标准的呈阶跃变化 AGC 指令, 可直接在相应的负荷上升、下降段内, 对符合测速条件的运行段进行速率的计算。最终得到相应的速率指标和精度指标。

取第 3 组 AGC₃ 的数据作为基准数据, 计算各组协方差指标和经济性指标, 得到的结果见表 6。

3.1.2 负荷控制系统综合评估

将第 3 组数据作为基准时段, 根据监测时段的协

方差指标和基于“两个细则”的经济性指标,计算负荷控制系统综合指标。由于本负荷控制系统的数据来源于现场,基准时段的运行情况良好,计算综合指标的权重系数选取准则满足条件2,结果见表7。

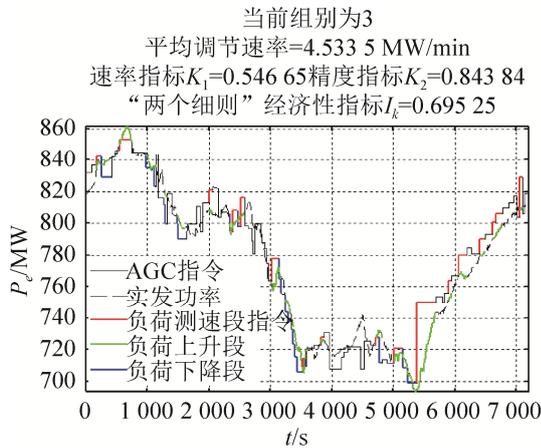


图5 超超临界机组经济性指标的计算例图

Fig. 5 Example diagram of calculation of economic index of ultra-supercritical unit

表6 超超临界机组负荷控制系统性能指标计算结果

Tab. 6 Calculation results of performance index of load control system for ultra-supercritical units

组别	协方差指标 I_v	经济性指标 I_k
AGC ₁	0.061 6	0.671 9
AGC ₂	0.074 2	0.673 0
AGC ₃	/	0.695 3
AGC ₄	0.212 4	0.238 6
AGC ₅	1.128 0	1.013 0

表7 超超临界机组负荷控制系统综合指标计算结果

Tab. 7 Calculation results of comprehensive index of load control system for ultra supercritical units

组别	综合指标(I)	综合评估结果
AGC ₁	0.501 0	中
AGC ₂	0.505 3	中
AGC ₄	0.231 3	优
AGC ₅	1.045 2	差

由表7结合表3的判断准则可知,相比于基准时段第3组:

(1) 第1组和第2组数据的协方差指标均很优秀,但二者的经济性指标都比较差,长久运行难以保证有较好的经济效益;综合评估结果为中,控制器参数、顺控工序等还需要做出进一步的

分析和调整。

(2) 第4组数据协方差指标、经济性指标结果理想,说明该时段机组能够稳定、安全运行,经济性优秀;综合评估结果为优。

(3) 第5组数据协方差指标、经济性指标很差,系统无法安全稳定运行,同时经济效益还受到了很强的制约;综合评估结果为差。控制器参数、顺控工序等还需要做出进一步的分析和调整。

根据现场数据可知,协方差指标和经济性指标客观、有效,负荷控制系统的评价结果符合实际。

3.2 某350MW超临界机组负荷控制系统的性能评价

选取华北电网某超临界机组负荷控制系统的实发功率跟随各自的AGC指令在3h20min内的运行数据,共为4组数据,结果如图6所示。

数据的采样间隔为1s,时间分别为

AGC₁:2019-04-17T20:40:01~2019-04-18T00:00:00;

AGC₂:2019-04-18T03:20:00~2019-04-18T06:40:00;

AGC₃:2019-04-19T05:26:40~2019-04-19T08:46:40;

AGC₄:2019-04-19T13:30:00~2019-04-19T16:50:00。

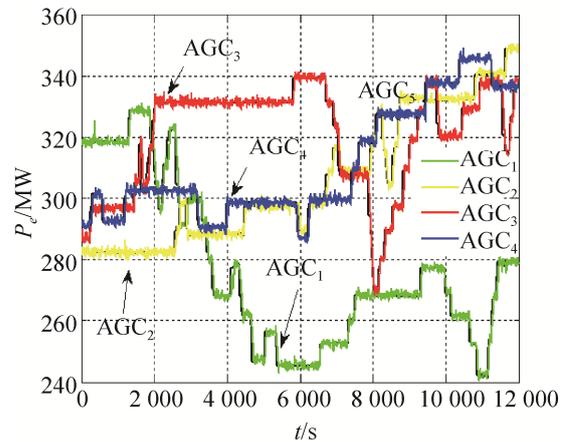


图6 选取的超临界机组的4组AGC运行数据

Fig. 6 Four sets of AGC operation data of a supercritical units

3.2.1 性能指标的计算

该厂的汽轮机组和燃汽轮机组共同参与AGC调节,负荷调节较为灵活,在“两个细则”的考核

中经济性指标会比较理想。但由于华北区域的 AGC 指令会呈现出类似锯齿状的非标准阶跃的形式。因此为了正确计算速率指标, 需要对指令数值进行标准阶跃化的算法处理。得到标准的阶跃指令后, 再使用和计算华东区域 AGC 数据一样的方法进行经济性指标的计算。

取第 2 组 AGC₂ 的数据作为基准数据, 计算协方差指标和经济性指标, 结果列表 8。

表 8 超临界机组负荷控制系统性能指标计算结果
Tab. 8 Calculation results of performance index of supercritical unit load control system

组别	协方差指标 I_v	经济性指标 I_k
AGC ₁	1.525 5	0.202 7
AGC ₂	/	0.074 9
AGC ₃	0.603 4	0.167 9
AGC ₄	0.746 9	0.176 1

3.2.2 负荷控制系统综合评估

将第 2 组数据作为基准时段, 根据监测时段的协方差指标和基于“两个细则”的经济性指标, 计算负荷控制系统综合指标。由于本负荷控制系统的数据来源现场, 基准时段的运行情况良好, 且各组经济性指标已经较为优秀, 计算综合指标的权重系数选取准则满足条件 3, 结果见表 9。

表 9 超临界机组负荷控制系统综合指标计算结果
Tab. 9 Calculation result of comprehensive index of supercritical unit load control system

组别	综合指标 I	综合评估结果
AGC ₁	0.745 0	差
AGC ₃	0.346 5	优
AGC ₄	0.410 1	良

由表 9 结合表 3 的评判准则可知, 相比于基准时段第 2 组:

(1) 第 1 组数协方差指标较差, 即使经济性良好, 在长久运行中也会伴有安全隐患; 综合评估结果为差, 控制器参数、顺控工序等还需要做出进一步的分析和调整。

(2) 第 3 组数据的协方差指标和经济性指标均

较为优秀, 综合评估结果为优;

(3) 第 4 组数据的协方差指标和经济性指标较为良好, 综合评估结果为良。

根据超临界机组的现场数据可知, 协方差指标和经济性指标客观、有效, 负荷控制系统的评价结果符合实际。

4 结论

本文首先研究了协方差矩阵的数学特性, 提出了改进的协方差指标。该指标利用机组实发功率和调度指令值的协方差矩阵, 来描述系统功率和设定值之间的协同程度, 能够反映监测时段系统的运行状况, 为负荷控制系统提供了初步的性能评价方法。其次, 本文研究了不同区域电网“两个细则”AGC 考核指标, 总结其一般规律, 提出了基于“两个细则”的经济性指标, 以发电经济性的角度对负荷控制系统进行评价, 能够体现电力系统对火电机组负荷控制系统的严格要求。最后, 将改进的协方差指标和基于“两个细则”的经济性指标进行结合, 使学术理论与工程实际需求融合在一起, 为火电机组负荷控制系统提供了一个综合的性能评价方法。通过仿真试验确立了评判准则, 利用现场数据对评价方法进行了验证, 指标数值结果准确, 表明本性能评估方法合理、有效。

本文提出的负荷控制系统性能评价方法将多变量控制系统的协方差评价理论与电力系统的“两个细则”AGC 考核指标联系在一起, 使系统的运行性能状况和发电经济性均得到了考虑, 能够为系统做出综合的性能评价, 同时也为负荷控制系统能够向更优更经济的调整提供一个合理、准确的参照。使得机组在稳定安全的运行中, 能够满足电力系统严格要求的同时又能保证自身的发电经济效益。

参考文献:

- [1] Harris T J, Boudreau F, Macgregor J F. Performance Assessment of Multivariable Feedback Controllers[J]. Automatica (S0005-1098), 1996, 32(11): 1505-1518.

- [2] Yang H, Li S Y. Data-driven Subspace Approach to MI-MO Minimum Variance Control performance assessment[C]// 10th World Congress on Intelligent Control & Automation(WCICA). IEEE,2012: 3157-3161
- [3] Shah S L, Patwardhan R, Huang B. Multivariate Controller Performance Analysis: Method Application and Challenges[J]. AIChE Symposium Series(Provided by: CiteSeerX.OAI identifier:oai: CiteSeerX. psu: 10.1.1.324.9704), 2002, 98(326): 190-207.
- [4] Wang Y S, Li S Z, Tian J Y, et al. Performance Assessment of Thermal Power Plant Load Control System based on Covariance Index[J]. Control Engineering Practice (S0967-0661). 2016(54): 58-69.
- [5] Yu J, Qin S J. Statistical MIMO Controller Performance Monitoring. Part I: Data-driven Covariance Benchmark[J]. Journal of process Control (S0959-1524), 2008, 18(3/4): 277-296.
- [6] Xiong B, Chen H, An Q. A Multi-objective Distance Friction Minimization Model for Performance Assessment Through Data Envelopment Analysis[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2019, 279(1): 132-142.
- [7] Sadi M, Arabkoohsar A. Exergoeconomic Analysis of a Combined Solar-Waste Driven Power Plant[J]. Renewable Energy (S0960-1481), 2019, 141(10): 883-893.
- [8] Persky R, Sauret E. Assessment of Turbine Performance Variability in Response to Power Block Design Decisions for SF₆ and CO₂ Solar Thermal Power Plants[J].Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2018, 169: 255-265.
- [9] 王立军, 李晓敏. “两个细则”条件下的超临界机组 AGC 协调控制优化[J]. 现代电力, 2011, 28(2): 84-89. Wang Lijun, Li Xiaomin. Optimization of AGC Coordinated Control for Supercritical Units Under the Condition of "Two Detailed Rules"[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 84-89.
- [10] 冯竞玥, 李治国. 350MW 火电机组 AGC 控制策略优化分析及应用实现[J]. 自动化应用, 2019(5): 120-122, 124 Feng Jingyue, Li Zhiguo. Optimization Analysis and Application Realization of AGC Control Strategy for 350MW Thermal Power Unit[J]. Automatic application, 2019(5): 120-122, 124.
- [11] Yu Z, Wang J, Huang B, et al. Performance Assessment of PID Control Loops Subject to Setpoint Changes[J]. Journal of process Control (S0959-1524), 2011, 21(8): 1164-1171.
- [12] 罗鹏. 火电厂协调控制系统建模及控制方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015. Luo Peng. Modeling and Control Method of Coordinated Control System in Thermal Power Plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.