[负荷管理]

煤矿机电系统中的电力负荷优化调节技术研究

文/陈明振
济宁市能源局

提出一种创新的基于智能控制的电力负荷优化调节技术。该技术通过预测电力需求，结合动态负荷分配机制和自适应优化策略，实现系统在不同工况下的高效运行。实验结果显示，智能控制策略显著提高负荷平衡度，降低系统能耗，并提升设备的利用率，表明该技术能够有效应对复杂负荷波动的挑战。该研究为提高煤矿机电系统的电力管理效率提供理论与实践支持。

煤矿是全球主要能源，对于国家能源供应和经济发展具有显著影响。煤矿生产自动化和机电设备的大规模应用，引发了巨大的电力负荷。传统的电力负荷分配方式难以应对多变的负荷需求，会造成能源浪费、设备利用率低以及系统运行不稳定等后果[1]。而智能控制技术通过负荷预测、动态分配和自适应优化等智能方法，实现对电力负荷的精准调节与优化。本文提出一种基于智能控制的电力负荷优化调节技术，通过优化架构设计、实时监控与反馈机制等手段，提升煤矿机电系统的电力利用率。

电力负荷优化调节技术现状分析

传统电力负荷管理方法往往依赖于静态规则和经验参数，无法应对复杂工况和频繁的负荷波动，造成设备利用率低下、资源损耗严重[2]。当前负荷预测技术通常依赖于简单的线性模型，难以对煤矿生产环境中的复杂变化进行捕捉，预测准确度表现得力不从心，导致电力分配调节滞后，实际负荷与电力供应存在明显偏差；现在技术层面也缺乏实时监控手段，无法实时掌握设备运行状态以及电力消耗状况，在负荷调整时难以快速做出响应，导致能源无法被恰当利用[3]；现有系统还缺乏自适应优化机制，不能根据实际工况和负荷需求的变化对负荷分配策略进行灵活调整；能源管理不足也是一大瓶颈，现有的能耗管理方法多基于预设的固定规则，难以在实际需求变化时做出相应调整，导致能源消耗无法得到有效控制。因此，针对煤矿机电系统中出现的负荷波动大、能源浪费严重、设备运行效率低等问题，亟需一种更为智能、灵活和高效的电力负荷优化调节技术来应对。

基于智能控制的电力负荷优化调节技术

1. 优化调节技术架构

如图1所示，优化调节技术架构基于负荷预测、动态负荷分配、实时监控反馈、自适应优化和能耗管理模块的协同作用，形成一个闭环的智能控制系统。首先，负荷预测模块利用智能算法预测未来的电力需求，提供数据支持；动态负荷分配模块根据预测结果分配电力资源，并与实时监控反馈模块保持联动，确保电力分配能够根据设备的实际运行状态及时调整；实时监控的数据被反馈给自适应优化模块，该模块根据反馈进行动态优化，使系统在不同负荷条件下都能灵活应对；最终通过模块的协同作用，能耗管理得以实现，系统在节能的同时确保

设备高效运行和负荷平稳调节。

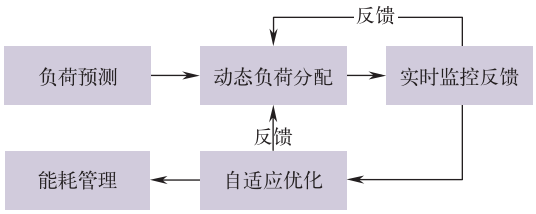

图1　优化调节技术架构

2. 负荷预测算法实现

本模块提出一种结合注意力机制的改进时序深度学习算法，用于精确预测未来的电力负荷。负荷数据首先被处理为时间序列向量$X=[x_1,x_2,\cdots,x_n]$，其中x_i表示第i时刻的负荷值。分析该时间序列，模型逐步学习历史数据的内在模式。引入注意力机制，对每个时间步的负荷值分配不同的权重，公式为

$$e_t=\tanh(W_e[h_{t-1},x_t]+b_e) \tag{1}$$

式中，e_t为当前时间步的重要性得分；h_{t-1}为上一时间步$t-1$的隐藏状态；x_t为当前时刻的负荷信息；W_e和b_e分别为权重矩阵和偏置项；tan$h$为激活函数。

再使用softmax函数对得分进行归一化处理，以便为每个时间步分配权重α_t，公式为

$$\alpha_t=\frac{\exp(e_t)}{\sum_{t=1}^{T}\exp(e_t)} \tag{2}$$

式中，T为时间步的总数。利用该权重分配机制，模型能够动态聚焦于对未来负荷影响最大的时刻。

在生成预测值的过程中，模型通过以下线性组合公式计算负荷预测值

$$\hat{y}_t=W_y h_t+b_y \tag{3}$$

式中，W_y和b_y为模型的权重矩阵和偏置项；h_t为t时刻的隐藏状态，包含通过输入x_t和注意力机制聚焦得到的上下文信息。

与传统方法相比，结合注意力机制的算法能够自动选择关键时间点，提升负荷预测的准确度和响应速度。

3. 动态负荷分配设计

为确保每个设备在电力需求变化时能够获得合适的电力资源分配，本文采用基于负荷需求比例的动态分配方案。首先根据每个设备的当前电力需求，计算其负荷分配比例，公式为

$$P_i=\frac{D_i}{\sum_{i=1}^{n}D_i}P_{\text{total}} \tag{4}$$

式中，P_i为第i个设备的电力负荷分配量；D_i为设备当前的电力需求；n为系统中设备总数；P_{total}为系统可供分配的总电力负荷。

为进一步优化电力的分配效率，引入负荷均衡策略，尽可能平衡设备之间的负荷分配。系统整体负荷平衡度，公式为

$$\Delta P=\max(P_1,P_2,\ldots,P_n)-\min(P_1,P_2,\ldots,P_n) \tag{5}$$

式中，ΔP表示系统中负荷分配差异度。

不断调整每个设备的P_i，将ΔP控制在较小的范围内，确保各设备间负荷分配相对均衡，提升系统运行的整体效率。

4. 实时监控反馈机制

系统引入高效反馈结构，持续监测设备的运行状态和电力负荷的使用情况，确保负荷分配的动态调整能够及时响应设备的实际需求。首先，系统借助传感器监测设备的实际功耗C_i，计算过程为

$$C_i=P_i\eta_i \tag{6}$$

式中，P_i为设备负荷分配功率；η_i为设备功率利用效率。

监控系统对比实际功耗与预期功耗，计算功耗误差

$$\Delta P_i=C_i-P_i \tag{7}$$

ΔP_i不为零时，表示当前负荷分配与设备的实际需求存在差异，需进行调整。为确保负荷分配与实际功耗保持一致，系统根据功耗误差进行调整，调整后的负荷分配量为

$$P_i'=P_i+\alpha\Delta P_i \tag{8}$$

式中，α为调整系数，控制调整的速度和幅度。

系统根据实时反馈的数据不断优化电力分配，确保各设备始终在最佳负荷状态下运行。

5. 自适应优化策略

系统引入自适应优化算法，在负荷需求变化时，自动调整分配策略，使电力资源得到最佳利用[4]。系统根据设备的当前状态和负荷需求变化率，计算负荷调整量ΔP_i^{opt}，公式为

$$\Delta P_i^{opt}=\beta(D_i-P_i) \tag{9}$$

式中，D_i表示设备的当前负荷需求；P_i为当前分配功率；β为调整系数，控制调整的灵敏度。

在负荷调整过程中，还考虑历史负荷变化的影响，优化后的功率分配量为

$$P_i' = P_i + \gamma \sum_{t=1}^{T} \Delta P_{i,t}^{\text{opt}} \tag{10}$$

式中，P_i'为优化后的功率分配量；γ为历史负荷调整系数；$\Delta P_{i,t}^{\text{opt}}$是过去时间$t$时刻的负荷调整量；$T$为考虑的历史时间步数。

6. 能耗管理

能耗管理环节，系统的目标是通过动态调整设备的电力分配和运行时间，最大限度地提高能源利用效率并减少不必要的能耗。系统会计算某一时间段内的总能耗E，公式为

$$E = \sum_{i=1}^{n} P_i T_i \tag{11}$$

式中，E为系统中所有设备在某一时间段内的总能耗；P_i为分配给设备i的功率；T_i为设备i在该时间段内的运行时间；n为设备总数。

对所有设备的能耗进行累加，系统可以评估整个系统在某一周期内的能源消耗情况。为优化能源使用，系统会实时监控每个设备的负荷情况和功耗水平，并根据当前工况进行动态调整。

应用分析

1. 技术实施背景

本次技术实施选取某大型煤矿机电系统作为应用场景，该系统拥有多个电力密集型设备，涵盖采煤机、皮带运输机和排水泵等设备，分别占据总负荷的35%、30%和25%，其余设备分布在剩余10%，设备的总装机容量为5 000 kW。实际生产过程中，设备的电力负荷存在较大波动，尤其是在采煤作业和运输作业的高峰时段，负荷波动幅度较大。现有电力负荷管理系统的静态分配策略，使设备在负荷高峰期容易出现过载或资源浪费的现象，因此需要一套智能化的负荷优化调节方案来实现电力资源的高效利用。

2. 具体实施流程

本次实验中，首先通过历史负荷数据和实时监控数据，系统利用负荷预测算法预测未来1 h的电力需求变化；接着基于预测结果和当前设备运行状态，动态负荷分配模块对设备进行电力资源的优化分配，确保每个设备的电力需求与供给相匹配；自适应优化模块则通过监控反馈机制，根据设备的实时功耗对分配结果进行细化调整，确保负荷分配随着工况的变化不断优化。为评估技术实施效果，本次实验设定3个评估指标：①负荷平衡度，衡量设备间负荷分配的均衡程度；②能耗降低率，即系统总能耗的下降幅度；③设备利用率，即设备在高效运行下的时间占比。对上述指标的实时监控和统计分析，评估技术实施对电力负荷调节和能耗管理的优化效果。

3. 实施效果分析

将本文提出的基于智能控制的电力负荷优化调节技术与传统静态负荷分配方法在相同的实验环境里进行对比，实验分别测试08:00—12:00、12:00—16:00、16:00—20:00和20:00—24:00四个时间段的效果情况，得到的结果见表1。

表1　实验结果对比

评价指标	时间段	传统静态	智能控制	改善幅度
负荷平衡度（%）	1	80.44	92.34	14.79
	2	82.31	94.26	14.52
	3	79.89	90.87	13.74
	4	81.52	93.19	14.32
	平均	81.04	92.67	14.34
能耗降低率（%）	1	8.52	15.29	79.46
	2	9.11	18.46	102.63
	3	8.73	16.32	86.94
	4	9.46	17.19	81.71
	平均	8.96	16.82	87.77
设备利用率（%）	1	75.48	87.64	16.11
	2	77.29	89.83	16.22
	3	74.34	85.26	14.69
	4	76.11	88.61	16.42
	平均	75.81	87.84	15.87

在负荷平衡度方面，传统方法的负荷平衡度平均为81.04%，而智能控制策略的平均负荷平衡度则达到92.67%，提高14.34%。智能控制策略在时间段1的负荷平衡度为92.34%，远高于传统方法的80.44%，显示在高负荷时段智能策略的强大适应性。智能控制策略在各时间段都能保持较高的平衡度，该策略能够动态调整电力分配，避免资源浪费和过载问题，确保设备之间的电力分配更加均衡。

在能耗降低率方面，传统方法的平均能耗降低率仅为8.96%，而智能控制策略的平均能耗降低率达到16.82%，提高87.77%。特别是在时段2，智能控制策略的能耗降低率高达18.46%，而传统方法仅为9.11%。表明智能控制策略能够通过实时监控

（下转第149页）

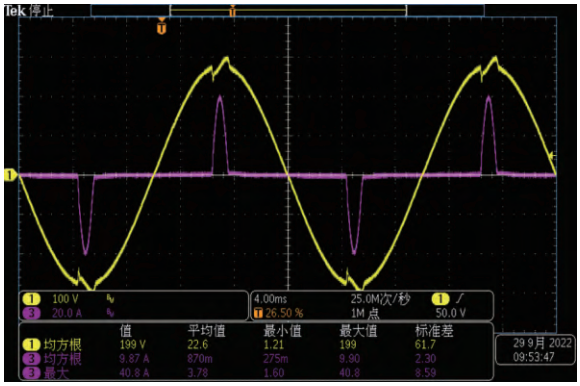

图15　满载下电压电流波形图

结束语

通过对峰值电流控制理论、仿真和实际工程样机的调试，可以得出其控制方法可以应用于大功率电源的控制当中，但对硬件的抗干扰要求比较高。相较于传统的电压电流双闭环控制，峰值电流模式可以做到响应速度更快、可靠性更高。文中未对峰值电流模式的次谐波振荡进行讲述，相关内容可查阅相关文献。由于斜坡补偿的存在，在一定程度上降低了电流响应的速度，从而影响了电源的动态响应时间。EA

（收稿日期：2024-11-26）

参考文献

[1] 王凤岩，许建平．V2C控制BUCK变换器分析[J]．中国电机工程学报，2006，26 (2)：121-126．

[2] 林维明．具有快速负载动态响应的DC/DC开关变换器控制新策略[J]．中国电机工程学报，2001，21(9)：133-139．

[3] 陈东华，谢少军，周波．瞬时值电流控制逆变技术比较[J]．南京航空航天大学学报，2004，36(3)：343-347．

[4] 谢力华，苏彦民．正弦波逆变电源的数字控制技术[J]．电力电子，2001，35(6)：52-60．

[5] 李颖，朱伯立，张威．Simulink动态系统建模与仿真基础[M]．西安：西安电子科技大学出版社，2004：50-150．

[6] 刘凤君．正弦波逆变器[M]．北京：科学出版社，2002：98-238．

（上接第110页）

和自适应优化，在不同负荷条件下灵活调整设备的功率分配，有效减少不必要的功耗，显著降低整体能耗。

在设备利用率方面，智能控制策略的平均值为87.84%，显著高于传统方法的75.81%，提升15.87%。在所有时间段内，智能控制策略都表现出较高的设备利用率，在时间段3虽然最低，但是相比传统方法提升了14.69%。实验结果表明，智能控制策略能够有效提升设备的运行效率，使设备在较长时间内保持高效运行状态，避免因静态负荷分配导致的设备低效运行。

结束语

本文提出的基于智能控制的电力负荷优化调节技术在煤矿机电系统中展示了显著的优势。通过负荷预测、动态负荷分配和自适应优化等智能技术的结合，实现电力资源的高效利用。实验结果表明，与传统静态负荷分配方法相比，智能控制策略在多方面均有显著提升。该技术提高设备的运行效率，减少能源浪费，为煤矿机电系统的高效、安全运行提供有力支持。EA

（收稿日期：2024-10-22）

参考文献

[1] 翟宗健．煤矿机电系统的可靠性分析与优化[J]．冶金与材料，2024，44(7)：25-27．

[2] 张惠隆，李晓泉．基于电化学储能的电力系统负荷调节和峰谷填平技术研究[J]．中华传奇(下旬)，2021(27)：188-190．

[3] 王历晔．面向多生产线工业电力负荷的调节方法及评价研究[D]．广州：华南理工大学，2022．

[4] 林俊光，周雅敏，冯彦皓，等．基于热湿负荷与自适应预测时域微网优化调度[J]．浙江大学学报(工学版)，2023，57(9)：1832-1842．