

[电力调度]

基于NSGA-II算法的柔性电网需求侧多目标调控研究

文/韩鸿愈 吕干云 叶林青 马 玓 章心因
南京工程学院电力工程学院

基于NSGA-II算法,针对柔性电网的需求侧进行多目标调控研究。建立了用户侧电力负荷模型,提出了柔性负荷和刚性负荷的分类,构建了需求侧响应的多目标优化模型,包括经济性、可靠性和舒适性三个优化目标。同时考虑了功率平衡和功率限制等约束条件。最后通过算例仿真验证了所提方法的有效性。

随着能源环境的变化和电力系统的发展,柔性电网作为一种新型电力系统结构,受到了广泛关注。柔性电网通过积极响应用户需求,实现了电力供需的平衡和优化,同时提升了电网的可靠性和经济性。其中,需求侧响应作为柔性电网的关键组成部分,能够通过调整用户侧负荷实现电力系统的优化调度。本文首先建立了用户侧电力负荷模型,明确了可削减负荷、可平移负荷和温控负荷等不同类型的负荷特点。在此基础上,构建需求侧响应的多目标优化模型,包括经济性、可靠性和舒适性三个优化目标。另外,对NSGA-II算法进行改进,该算法融合了快速非支配排序、拥挤度和精英策略等核心思想,使之对本文调度模型进行优化求解。最后,结合IEEE-33节点模型进行合理性验证,通过仿真结果说明了所提方法的有效性与实用性。

用户侧电力负荷模型

1. 分布式发电模型

分布式发电是柔性电网中的重要组成部分,其中光伏发电和风力发电是两种主要的分布式发电形式。这些分布式发电系统能够在用户侧产生电力,减少对中央电力系统的依赖,从而提高电网的可靠性和可持续性。

(1) 光伏发电出力模型

光伏发电是利用太阳能辐射将光能转化为电能的过程。光伏发电系统的出力模型通常基于太阳辐射强度和温度等因素。一种常见的光伏发电出力模型可以表示为

$$P_{PV} = \eta_{PV} A G (1 - \beta (T - T_{ref})) \quad (1)$$

式中, P_{PV} 为光伏发电系统的输出功率; η_{PV} 为光伏组件的效率; A 为光伏组件的表面积; G 为太阳辐射强度; β 为光伏温度系数; T 为环境温度; T_{ref} 为参考温度。

(2) 风力发电出力模型

风力发电是利用风能将风的动能转化为机械能,再经过发电机转化为电能的过程。风力发电机组的输出功率与风速之间存在着紧密的关系,风速越大,发电机组的输出功率越高。一般来说,风力发电机组的输出功率与风速之间的关系可以近似表示为

$$P_{wind} = 21 \rho A C_p V^3 \quad (2)$$

式中, P_{wind} 为风力发电机组的输出功率; ρ 为空气密度; A 为风力发电机组的叶片面积; C_p 为功率系数,表示从风能到机械能的转换效率; V 为风速。

风能发电机组的输出功率受到风速的影响,这

意味着在不同的风速条件下,风力发电机组的发电能力会有所不同。这种模型可以帮助预测和优化风力发电系统的性能,以实现最大的能源转换效率。

综上所述,分布式发电模型是柔性电网中重要的组成部分,光伏发电和风力发电作为两种主要形式,其出力模型可以帮助理解和优化这些发电系统的性能,从而更好地实现电力供应的可靠性和可持续性。

2. 居民侧用电负荷模型

(1) 柔性负荷

柔性负荷是指那些可以在一定程度上调整用电时段的负荷,但是受到生产工序的限制,只能整体平移用电曲线。这种负荷的典型代表是工业高载能负荷,通常与电网签订合同,约定了停电补偿等相关条款,并按照电网的调度计划来安排次日的生产用电曲线。柔性负荷的特点在于:它可以在一定范围内适应电力系统的需求变化,从而提高电力系统的灵活性和稳定性。

在柔性负荷中,可以进一步将其分为不同的类型,以便更好地理解其特性和应用。

1) 可削减负荷。可削减负荷是指在启动后可以中断,并且其用电量可以进行调整的负荷。典型的可削减负荷包括空调、热泵和加热器等。这些负荷的响应速度较快,因此在电力供需紧张时,可以通过削减它们的用电量来减轻系统负荷。然而,为了鼓励用户参与负荷削减,需要向用户提供经济补偿,考虑削减时间、停电损失等因素,并对削减的负荷功率和时间进行严格的限制。

2) 可平移负荷。可平移负荷是指一旦启动就不可中断,会一直运行到一个运行周期结束的负荷。这种负荷的特点是它们的启动时间相对较灵活,但在运行周期内用电量固定且工作功率特性保持不变。典型的可平移负荷包括洗衣机、电饭锅和扫地机器人等。尽管这些负荷在启动时间上具有一定的弹性,但在运行过程中它们的用电特性是固定的。

3) 温控负荷。温控负荷是用于调节室内温度的负荷,典型的代表是空调。这类负荷的功率消耗与实际温度和期望温度之间存在密切的关系。为了保持舒适的室内环境,温控负荷会根据温度变化

自动调整其功率。这种调节通常可以用动态等式表示,以确保室内温度始终保持在用户期望的范围内。

在柔性电网中,充分利用柔性负荷的特性,可以更好地应对电力系统的需求波动,实现电力系统的优化调度和资源利用。对不同类型的柔性负荷进行合理的管理和控制,有助于提高电力系统的可靠性、灵活性和经济性。

(2) 刚性负荷

刚性负荷是指那些在启动后不可中断,直到完成工作周期才停止的负荷。与柔性负荷不同,刚性负荷的运行过程中不能被中断,无法调整用电时段,不参与需求响应。这类负荷的特点在于它们的运行功率和运行时间都是固定的,不受系统的调控影响。

刚性负荷通常涉及一些用电设备,它们的工作过程一旦开始就不能中断,中断会影响到用户的使用体验。像计算机服务器、医疗设备等就属于刚性负荷。这些设备需要持续稳定的电力供应,以保证正常运行,中断可能会导致数据丢失、生产中断等严重后果。因此,合理管理刚性负荷非常重要,尽管刚性负荷不会参与需求响应,但仍然需要在系统规划和调度中考虑它们的存在,以确保电力系统的可靠性和稳定性。通过综合考虑柔性负荷、刚性负荷以及分布式发电等因素,可以更好地实现电力系统的平衡和优化。

需求侧响应多目标优化模型

1. 目标函数——三个优化目标

在柔性电网需求侧多目标调控研究中,需要明确优化的目标,以便找到合适的策略和方法来平衡不同的目标。本研究中,提出了三个优化目标,分别是经济性、可靠性和舒适性。

(1) 经济性——减少用电成本

居民用户参与需求响应的主要目的在于节省费用,通过电价激励,居民用户合理安排用电负荷的运行功率和时间,减少电耗费用,提高居民家庭的经济性。因此将电耗费用 $F_{\cos t}$ 作为优化目标函数,其表达式为

$$F_{\cos t} = \min \sum_k \sum_{t \in A_k} (l_t^k q_t \Delta t) \quad (3)$$

式中, q_t 为 t 时刻电价。基于日前电价, 通过优化使电耗费用最低。

(2) 可靠性——降低电压偏差

可靠性是另一个重要的优化目标。家用负荷的电压与用户的日常生活质量密切相关。为了提高电能质量, 需要降低家用负荷的实际电压与额定电压之间的偏差。这可以通过降低一个优化周期内家用负荷的最大电压偏差来实现。即

$$f_2 = \min(\max |V(t) - V_N|, t = 1, \dots, T) \quad (4)$$

式中, $V(t)$ 为 t 时刻用户的实际电压; V_N 为额定电压; T 为一个优化周期。

(3) 舒适性——提高用户满意度

除了经济性和可靠性外, 舒适性是柔性电网需求侧多目标调控中的另一个重要考虑因素。舒适性目标关注用户的使用体验和生活品质, 特别是在涉及温控负荷时, 如电空调。

在舒适性目标中, 需要考虑室内温度的调节, 以确保用户在不同季节和时间段内获得适宜的室内温度。对于温控负荷, 如何调整其功率以维持舒适的室内温度是一个关键问题。一种常见的方法是通过动态等式来描述室内温度的变化, 表达式为

$$T(t+1) = \alpha T(t) + \beta T_{out} + \gamma P_{AC}(t) \quad (5)$$

式中, $T(t+1)$ 为下一个时刻的室内温度; $T(t)$ 为当前时刻的室内温度; T_{out} 为室外温度; $P_{AC}(t)$ 是当前时刻电空调的功率; α 、 β 和 γ 为系数。

2. 约束条件

在柔性电网需求侧多目标调控研究中, 约束条件是确保优化方案的合理性和可行性的重要组成部分。在此研究中, 引入了两种约束条件, 分别是功率平衡约束和功率限制约束。

(1) 功率平衡约束

功率平衡约束是指确保电力系统的供需平衡, 即电力系统中产生的电量要满足用户的实际用电需求。在考虑电网买卖电量、风力发电电量和光伏发电电量的情况下, 可以将它们的总和与用户当前的用电量进行比较。具体表达式为

$$\sum_t P_{grid}(t) + P_{wind}(t) + P_{PV}(t) = P_{demand}(t) \quad (6)$$

式中, $P_{grid}(t)$ 为时刻 t 的电网买卖电量; $P_{wind}(t)$ 为时刻 t 的风力发电电量; $P_{PV}(t)$ 为时刻 t 的光伏发电电量; $P_{demand}(t)$ 为时刻 t 的用户用电需求。

该约束条件确保了电力系统供需的平衡, 避免

了电力不足或过剩的情况。

(2) 功率限制约束

功率限制约束是指每种分布式电源的输出功率都必须处于一个最大值和最小值的约束区间内。这是为了确保分布式电源运行在合理的范围内, 避免过载或低载的情况。具体地, 在考虑风力发电和光伏发电的情况下, 可以表示为

$$\begin{aligned} P_{wind,min} &\leq P_{wind}(t) \leq P_{wind,max} \\ P_{PV,min} &\leq P_{PV}(t) \leq P_{PV,max} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $P_{wind,min}$ 和 $P_{wind,max}$ 分别为风能发电机的最小和最大输出功率; $P_{PV,min}$ 和 $P_{PV,max}$ 分别为光伏电源的最小和最大输出功率。

这些约束条件保证了分布式电源的输出在合理范围内, 以确保电力系统的稳定运行。

综上所述, 约束条件在柔性电网需求侧多目标调控研究中起着至关重要的作用, 确保了优化方案的可行性和合理性, 同时保障了电力系统的稳定供电。

改进的NSGA-II优化算法

改进后的NSGA-II算法基于原有的NSGA-II算法, 在核心思想的基础上进行了一些优化, 以更好地解决柔性电网需求侧多目标调控的问题。本节介绍这一改进后的NSGA-II算法的主要特点和优化措施。

1. 快速非支配排序

改进后的NSGA-II算法仍然采用快速非支配排序技术, 这有助于对种群中的解进行精准的划分, 区分出支配关系和非支配关系。通过对解集进行排序, 建立不同的Pareto前沿, 形成不同的解集层级, 有助于在多目标优化问题中找到更多的优质解。

2. 拥挤度和拥挤度比较算子

为了进一步增强NSGA-II算法的多样性和收敛性, 改进后的算法引入了拥挤度和拥挤度比较算子。拥挤度是一种衡量个体在Pareto前沿上的分布密度的指标, 较高的拥挤度表示个体在Pareto前沿上分布得较为稠密。通过对个体的拥挤度进行排序和比较, 可以更好地保持Pareto前沿的多样性, 防止算法陷入局部最优。

拥挤度计算公式为

$$\text{CrowdingDistance}(x) = \sum_{i=1}^M (F_i^{\max} - F_i^{\min}) \quad (8)$$

式中, M 为优化目标的数量; $F_i^{\max}$ 和 $F_i^{\min}$ 分别为第 i 个目标在Pareto前沿上的最大和最小值。拥挤度越大,表示解在Pareto前沿上的分布越稀疏。

3. 精英策略的引入

改进后的NSGA-II算法还引入了精英策略,以确保优秀的解能够得到保留和传递。在每一代的进化过程中,选择出一部分优质解作为精英个体,使它们具有更高的概率被保留下来。这有助于保持种群的多样性,同时也能够提高算法的收敛速度。

4. 算法的改进效果

改进后的NSGA-II算法在柔性电网需求侧多目标调控问题上具有更好的性能。快速非支配排序、拥挤度和拥挤度比较算子以及精英策略的引入使得算法能够更好地探索解空间,找到更优质的Pareto前沿解。有助于在经济性、可靠性和舒适性三个目标中找到更好的平衡,并为柔性电网的优化调度提供更有效的解决方案。

综上所述,改进后的NSGA-II算法在柔性电网需求侧多目标调控研究中具有更好的性能和适应性,有望为实际应用中的电力系统调度问题提供更可行的解决方案。

算例仿真

本节通过IEEE-33节点模型进行算例仿真,验证改进后的NSGA-II算法在柔性电网需求侧多目标调控问题上的性能和效果。使用实际的电力负荷和分布式发电数据对算法进行仿真实验,并对结果进行分析和讨论。

1. 实验设置

考虑一个柔性电网系统,包括多个用户侧电力负荷、分布式光伏发电和风力发电等。用户侧负荷包括不同类型的柔性负荷和刚性负荷。目标是在经济性、可靠性和舒适性等多个指标下,优化分布式发电和负荷的协调调度策略。系统调度周期为 $T = 24 \text{ h}$,将其等分为96个时间段,每个时间段长 $\Delta t = 15 \text{ min}$ 。算例系统中,分布式电源包括总容量为 2.5 kW 的分布式风光发电系统和总容量为 $10 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的蓄电池系统。

预测得到的次日分布式风光发电出力期望值与波动范围、室外温度预测分别如图1、图2所示。

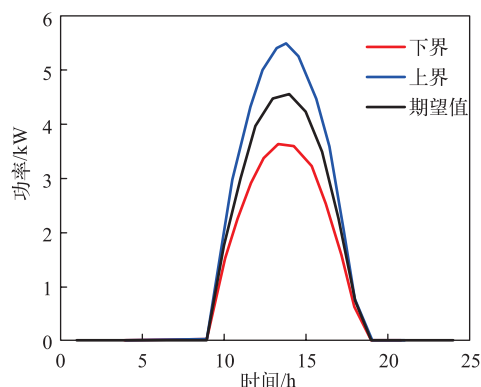


图1 分布式发电预测出力及波动范围

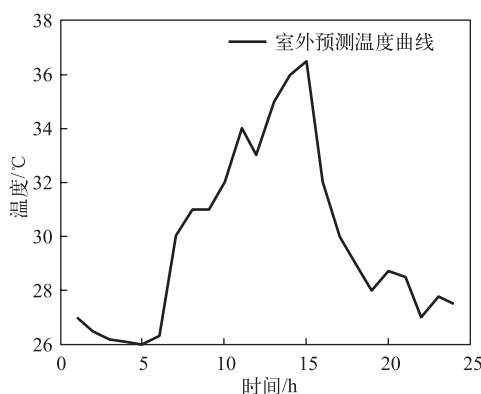


图2 预测室外温度值

2. 优化目标

在仿真中,使用之前定义的经济性、可靠性和舒适性作为优化目标。经济性目标是最小化电耗费用,可靠性目标是降低电压偏差,舒适性目标是改善负荷的调节性能。目标是找到在这三个目标下的最优解集。

经济性目标函数

$$\text{Minimize: } F_{\text{cost}} = \sum_t q_t P_t \quad (9)$$

可靠性目标函数

$$\text{Minimize: } \max |V(t) - V_N| \quad (10)$$

为了验证所提出的改进优化调度模型的合理性,本文提出的改进精英策略的NSGA-II算法对上述场景进行求解。算法的初始种群数量设为500,迭代次数设为100,结合测试函数对算法进行验证,其中分布均匀值越小,代表种群分布越均匀。由此可知,本文改进的算法训练过程中种群分布均匀,收敛速度快,具体Pareto解集档案如图3所示。

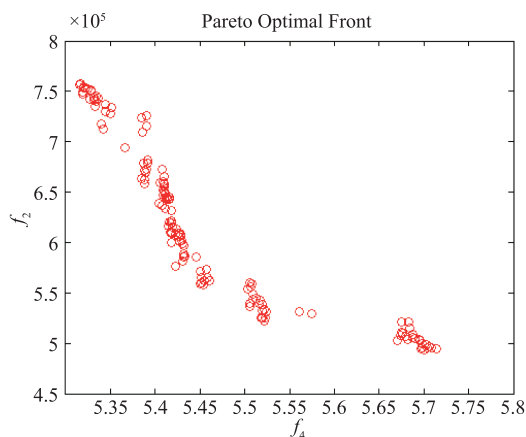


图3 Pareto解集档案

3. 仿真结果与分析

本文采用 MATLAB 软件通过YALMIP工具箱调用CPLEX求解器,对改进后的NSGA-II算法进行多次仿真实验,得到了一系列在不同权重下的Pareto前沿解。这些解能够为电力系统决策提供多样化的选择。改进后的NSGA-II算法能够有效地在多个目标下搜索优质解集,从而帮助决策者在多目标调度中做出更具合理性和可行性的决策。通过比较不同权重下的解集,可以为柔性电网的优化调度提供更多的可能性和选择。在经济性、可靠性和舒适性三个目标中,每个目标都有其对应的优化函数和约束条件。

居民负荷分为固定负荷及可调度负荷,固定负荷随意调度,将影响用户正常生活。因此对固定负荷不做调度,得到的基本负荷曲线如图4所示。从图4中可看出,16:00—22:00负荷大幅上涨,考虑对可调度的负荷进行调度,既可以减少用电成本,又能保证用户的舒适度。

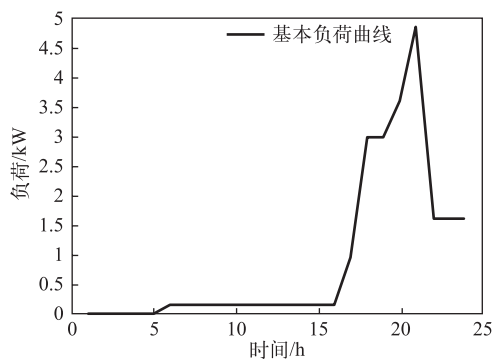


图4 基本负荷曲线

洗衣机、洗碗机等可平移柔性负荷的运行时间

应当适当调整,功率曲线如图5所示,调整到风光发电较为充裕的时间段,提高了光伏的本地消纳水平。空调系统通过优化调度,如图6所示,在维持室内温度在设定的舒适温度区间内,同时避免了长时间连续运行,降低了用电成本。不进行对刚性负荷的调度,将其控制权交还用户,保证了用户的用电自由,提高了用户满意度。

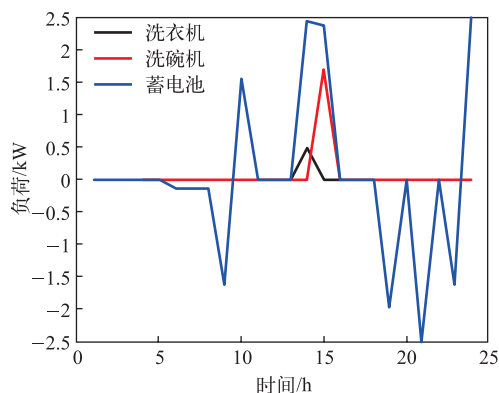


图5 柔性负荷功率曲线

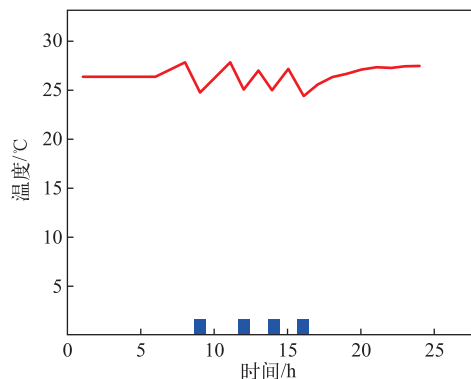


图6 温控负荷功率与室内温度曲线

对整个调度周期(即0~24 h)运用改进的NSGA-II优化策略,系统总用电成本为10.34元,如图7所示,其中,用电成本在20:00时最高,为4.86元。图8展示了整个调度周期的用电功率曲线,可见优化调度后,保障了用户刚性负荷的使用,在节约用电成本的同时,降低了电压偏差。

由此可见,相比于运用NSGA-II的优化方法,本文提出的改进算法具有明显优势,有效地降低了系统运行成本,提高了家庭用电的经济性。文中算例为简便起见,考虑的家用电种类较少,仅仅考虑空调、洗衣机等柔性负荷,而现实生活中随着用户家庭生活水平的提高及夜间生活的丰富,家用电

器的种类与数量将进一步增多,需进一步改进优化算法。

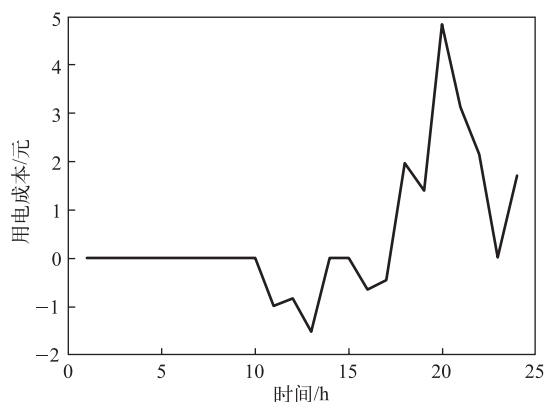


图7 需求响应后的用电成本曲线

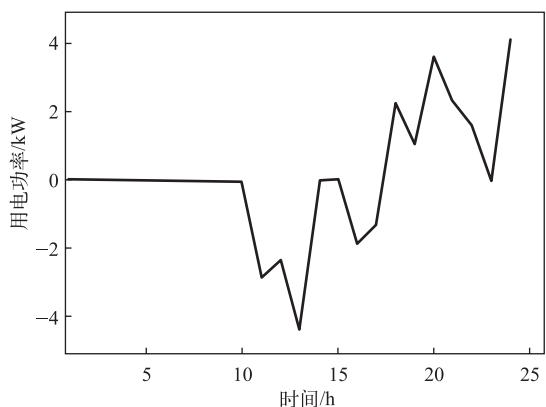


图8 用电功率曲线

结束语

综上所述,本研究的改进后NSGA-II算法为柔性电网需求侧多目标调控问题的解决提供了新的思路和方法。通过充分挖掘不同负荷类型的特点,建立了优化模型,并对算法进行了改进,加快了模型实际求解速度,为实际电力系统调度问题的决策提供了更具合理性和可行性的解决方案。这一研究在推动可再生能源与电力系统融合发展、提升电网经济性和可靠性方面具有重要意义,对于实现能源转型和可持续发展目标具有积极的促进作用。EA

(收稿日期:2023-10-12)

参考文献

[1] XU Bo, WANG Jiexin, GUO Mengyuan, et al.

A hybrid demand response mechanism based on real-time incentive and real-time pricing[J]. Energy, 2021, 231.

[2] 赵波,包侃侃,徐志成,等.考虑需求响应的光储并网型微电网优化配置[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5465-5474.

[3] 杨明玉,韩旭.基于需求响应的微网孤网运行实时调度策略研究[J].现代电力,2015,32(4):12-18.

[4] VIVEKANANTHAN C, MISHRA Y, LEDWICH G, et al. Demand response for residential appliances via customer reward scheme[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 5(2): 809-820.

[5] MURTAGH N, NATI M, HEADLEY W R, et al. Individual energy use and feedback in an office setting: A field trial[J]. Energy Policy, 2013, 62(9): 717-728.

[6] ZHANG T, SIEBERS P O, AICKELIN U. A three-dimensional model of residential energy consumer archetypes for local energy policy design in the UK[J]. Energy Policy, 2012, 47(10): 102-110.

[7] 宋艺航,谭忠富,李欢欢,等.促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J].电网技术,2014,38(3):610-615.

[8] 赵珍珍,王维庆,樊小朝,等.基于NSGA-II-PSO算法的微电网多目标优化运行模式[J].电源学报,2023,21(01):118-125.

[9] 刘明明,王谦,赵宜馨,等.基于自适应差分进化算法的经济负荷调度方法研究[J].电气应用,2022,41(2):64-69.

[10] 荆巍巍,章磊,田俊.基于自适应NSGA-II算法的柔性车间多目标生产调度[J].组合机床与自动化加工技术,2020(8):151-155,160.

[11] 王秀丽,李淑慧,陈皓勇,等.基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J].中国电机工程学报,2006(12):11-15.

[12] 黎嘉明,邸鹏宇,樊玮,等.冲击负荷的超短期区间预测方法及其应用[J].电气应用,2021,40(10):43-47.