[抽水蓄能]

抽水蓄能电站调度优化与500 kV主变压器谐波抑制的联合研究

文/李玉鹏[1] 赵光慧[1] 杨贵生[1] 李彦龙[2]
1. 河北易县抽水蓄能有限公司；2. 安徽绩溪抽水蓄能有限公司

针对抽水蓄能电站调度优化与500 kV主变压器谐波抑制的协同问题，提出一种联合优化模型，以实现电力系统的经济运行与电能质量的提升。该模型结合粒子群优化算法和多目标遗传算法，优化抽水蓄能电站的调度策略，并通过滤波器与主动补偿技术降低主变压器谐波失真。研究结果表明，调度优化与谐波抑制的联合优化能够有效提升电力系统的整体性能，具备较强的应用潜力。

随着电力需求的不断增加，电力系统的可靠性与稳定性面临着日益严峻的挑战。为了应对波动性和不稳定性的电力供应，抽水蓄能电站作为一种重要的电能储存和调度手段，逐渐成为调节电力系统频率与电压波动的关键设施。抽水蓄能电站不仅能够有效提高电力系统的灵活性，还能够在峰谷电价差异较大的情况下进行电能调度，从而实现系统的优化运行[1]。然而，随着电力负荷的多样化和高比例可再生能源的接入，电网的调度问题日益复杂，对抽水蓄能电站的调度优化提出了更高的要求。

500 kV主变压器作为电力系统中的重要设备，面临着电力质量和稳定性的挑战。主变压器在运行过程中容易产生谐波，谐波不仅会影响电力系统的效率，还可能对设备造成损坏，降低系统的运行寿命[2]。谐波污染对变压器的影响不仅表现为功率损耗增加，还可能导致系统的故障和不稳定，因此如何有效抑制500 kV主变压器的谐波，成为提高电力系统电能质量的关键问题。当前，尽管谐波抑制技术已有较多研究，但其在大规模电力系统中的应用仍面临诸多挑战。

本文旨在探讨抽水蓄能电站调度优化与500 kV主变压器谐波抑制的联合研究。提出一种联合优化模型，结合了抽水蓄能电站的调度优化与主变压器的谐波抑制，以期在保证电网稳定运行的同时，提升电能质量和设备运行效率。该研究不仅有助于进一步提高抽水蓄能电站的运行效率，还为电力系统中谐波污染的有效治理提供了新的思路。通过对比现有的优化方法和抑制技术，本文展示联合优化模型在电力系统调度和电能质量管理中的潜在应用价值与优势。

相关工作综述

1. 抽水蓄能电站调度优化研究

抽水蓄能电站调度优化作为电力系统调度中的重要问题，近年来得到了广泛关注。调度优化的目标通常是最小化系统的运行成本，并满足电力需求的平衡以及设备的运行约束。研究中常用的方法包括经典的线性规划、混合整数线性规划以及基于启发式的算法，如遗传算法、粒子群优化算法等。这些方法在考虑电力需求波动和储能设备的使用限制时，能够为系统提供较为高效的调度策略[3]。近年来，随着电力市场化改革的推进，越来越多的研究开始将电力市场的价格波动纳入调度优化模型，进一步提高了模型的复杂性和现实意义。除了单一的

调度优化，部分研究开始尝试将调度优化与其他目标（如电网稳定性、环境影响等）结合，提出多目标优化模型。这类研究为电力系统的高效运行提供新的思路，尤其在动态调度和需求响应管理等方面取得显著进展。

2. 500 kV主变压器谐波抑制技术

500 kV主变压器作为高压电力系统中的关键设备，其谐波问题一直是影响电能质量的主要因素之一。谐波产生的主要原因包括非线性负载、电力电子设备的使用等，谐波不仅会导致设备过热、损坏，还会影响系统的稳定性和电能质量。为抑制变压器谐波，研究者们提出多种技术方案，主要包括被动滤波器、主动滤波器和混合滤波技术。被动滤波器通常采用电容、电感等元件，能够有效滤除特定频率的谐波成分，但对于谐波频率的变化不具备适应性。主动滤波器则通过逆变器产生补偿电流，能够实时调整以消除谐波，是目前广泛应用的技术之一。此外，随着技术的进步，近年来也有研究提出了基于分布式控制的谐波抑制方法，并与智能电网技术相结合，进一步提高了抑制效果和适应性。多种谐波抑制技术的结合，尤其是在大规模电力系统中的应用，为电网的稳定性和电能质量改善提供了有效保障。

研究方法

1. 抽水蓄能电站调度优化模型

抽水蓄能电站调度优化的核心目标是通过合理的调度策略，实现电力系统的经济运行与供需平衡。本文的调度优化模型通过最小化电力系统的运行成本来描述抽水蓄能电站的调度问题。目标函数表示为

$$\min\sum_{t=1}^{T}C_t\cdot P_t \tag{1}$$

式中，C_t是时间段t的单位发电成本；P_t是时间段t的发电功率；T是调度时段的总长度。

该目标函数旨在优化系统在各个时段的运行成本，从而提高电力系统的整体经济效益。

调度优化问题的约束条件包括电力平衡约束、储能设备的容量约束及电网稳定性要求。电力平衡约束保证了发电与负荷需求的平衡，即

$$P_t=D_t+L_t \tag{2}$$

式中，P_t为发电功率；D_t为负荷需求；L_t为系统的损耗功率。

除此之外，储能设备容量的限制要求发电功率与储水容量始终处于设备的安全操作范围内。具体的储能约束为

$$P_{\min}\leqslant P_t\leqslant P_{\max} \tag{3}$$

式中，$P_{\min}$和$P_{\max}$分别为发电功率的最小值和最大值，保证了储能系统在不同负荷情况下的安全运行。

2. 500 kV主变压器谐波抑制模型

在电力系统中，变压器的谐波源主要来源于负载的不对称性和电流波形的非线性。500 kV主变压器的谐波抑制问题在本文中通过建立谐波电流的数学模型来进行描述。谐波电流I_h可表示为

$$I_h=I_n+\sum_{k=1}^{K}A_k\sin(k\omega t+\phi_k) \tag{4}$$

式中，I_n是基波电流；A_k表示第k次谐波的幅值；ω是电网的基频；t是时间；ϕ_k为第k次谐波的相位；K为谐波次数。

该模型能够精确描述变压器中不同谐波频率成分的特性。

为降低谐波电流对电力系统的影响，通过两种主要方法进行谐波抑制。首先，采用滤波器技术，通过设置适当的电容和电感元件，将特定频率的谐波成分滤除。其次，采用主动谐波补偿技术，通过引入逆变器与补偿电路，在谐波源处产生与谐波电流相反的电流，从而抵消谐波，保证电网的电能质量。通过合理的谐波抑制策略，可以将变压器输出电流中的谐波成分降至最低，并有效减少对电力系统设备的损害，提高电力系统的稳定性与效率。

3. 联合优化模型与方法

在本文的研究中，调度优化与谐波抑制问题需要同时考虑，以实现电力系统的整体优化。为了求解这一多目标优化问题，提出了联合优化模型，旨在同时优化抽水蓄能电站的调度和500 kV主变压器的谐波抑制。联合优化问题的目标函数为

$$\min\left(\sum_{t=1}^{T}C_t\cdot P_t+\lambda\cdot\sum_{h=1}^{H}(I_h^2)\right) \tag{5}$$

式中，λ为调节调度优化与谐波抑制之间平衡的权重参数；H为谐波次数；I_h是谐波电流的幅值。

该目标函数结合两项优化任务，既考虑电力系

统的运行成本，又考虑了变压器的谐波抑制效果。优化目标是使系统在满足电力需求的同时，降低谐波失真，确保电网的电能质量。

为解决该多目标优化问题，本文采用了多目标遗传算法（Multi-Objective Genetic Algorithm，MOGA）与粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization，PSO）的结合。多目标遗传算法通过引入多个目标的适应度评估，能够在优化过程中兼顾不同目标之间的平衡，而粒子群优化算法则通过全局搜索和局部调整相结合，确保优化解的全局性和精确性。通过对这两种算法的结合与改进，能够有效处理调度优化与谐波抑制之间的权衡问题。

在实际应用中，算法的初始种群通过随机生成，并通过适应度函数对每个个体进行评估。随着迭代的进行，种群逐渐进化，最终获得最优的调度方案和谐波抑制方案。通过该联合优化方法，能够同时实现电力系统运行成本的最小化和电能质量的提升，从而有效提高电力系统的整体效益。

实验

1. 实验数据与实验设置

本文实验所使用的数据集来源于某地区电力系统及500 kV主变压器的实际运行数据。数据集包含抽水蓄能电站的发电功率、负荷需求、储能容量以及变压器的负载情况。具体数据包括系统在不同时间段的负荷需求、变压器的电流波形和谐波成分。此外，实验还选取了电网的运行成本数据，并记录了变压器谐波的幅值和频率。

实验设置中，调度优化的时间段为24 h，具体时段的负荷需求数据按小时进行划分。为了验证调度优化与谐波抑制联合优化模型的效果，实验过程中选择了三种典型的优化方法进行对比，包括单一调度优化、单一谐波抑制优化及联合优化模型。对于每种优化方法，实验均采用相同的电力需求数据、变压器谐波数据及相同的约束条件，以保证实验结果的可比性。

在优化算法的选择上，单一调度优化和联合优化问题均采用粒子群优化算法（PSO），单一谐波抑制优化采用多目标遗传算法（MOGA）。实验中，粒子群优化算法的最大迭代次数设定为1 000次，粒子数目为50；多目标遗传算法的种群规模设为100，最大代数设为500。对于联合优化模型，算法结合了PSO与MOGA，保证了在多目标优化过程中，既考虑电力系统的运行成本，又兼顾变压器的谐波抑制效果。

2. 实验结果与分析

实验结果通过表格的方式呈现，评估了不同优化方法在调度优化与谐波抑制中的表现。三种优化方法的主要评价指标见表1，包括运行成本、谐波失真率及系统稳定性等。

表1　不同优化方法的评价指标对比

优化方法	运行成本/万元	谐波失真率（%）	系统稳定性/次
单一调度优化	45.3	12.4	3
单一谐波抑制优化	48.1	6.8	4
联合优化模型	43.6	4.2	2

可以看出，单一调度优化方法的运行成本最低，但谐波失真率较高，且系统稳定性表现一般。单一谐波抑制优化虽然能够显著减少谐波失真率，但其运行成本相对较高，且系统稳定性有所下降。相比之下，联合优化模型在运行成本、谐波失真率和系统稳定性方面均表现出较好的平衡，能够在保证较低运行成本的同时，有效降低谐波失真，提升系统稳定性。

进一步分析实验结果可见，联合优化模型的表现优于单一优化方法。通过将调度优化与谐波抑制结合，能够更好地实现电力系统的经济运行和电能质量的提升。与单一调度优化相比，联合优化模型不仅减少了运行成本，而且通过综合考虑谐波抑制，显著降低了谐波失真率。在系统稳定性方面，联合优化方法也表现出较好的效果，表明该方法能够在不同优化目标之间实现较为理想的平衡。

通过实验结果可以得出，联合优化模型能够同时优化抽水蓄能电站的调度和变压器的谐波抑制问题，提升电力系统的整体性能。因此，该方法在实际电力系统调度与谐波抑制中具有较强的应用前景。

结束语

作为电力系统中的重要调节设备，抽水蓄能电站的调度优化与电能质量问题一直是研究的重点。本文提出的联合优化模型，通过同时优化抽水蓄能电站的调度策略和500 kV主变压器的谐波抑制，能够有效降低运行成本，改善电能质量，并提升系

统稳定性。实验结果表明，联合优化方法在多个评价指标上表现优异，特别是在减少谐波失真和提高系统稳定性方面具有显著优势。未来的研究可以进一步探索该模型在不同电力系统中的应用，优化算法的效率与准确度，及其在更大规模电网中的适应性。EA

（收稿日期：2024-12-31）

参考文献

[1] 牛云龙，李欣，康晓义，等．抽水蓄能电站主变压器空载合闸励磁涌流抑制分析[C]//抽水蓄能电站工程建设文集2021．河南国网宝泉抽水蓄能有限公司，2021：5．

[2] 姜爱军，方品政，胡南，等．抽水蓄能电站静止变频起动谐波特性分析及抑制策略[J]．智慧电力，2024，52(8)：113-121．

[3] 袁波，吕鹏飞，茅雨培，等．抽水蓄能电站静止变频启动电能质量分析与抑制措施研究[J]．水电与抽水蓄能，2022，8(5)：116-120．

（上接第169页）

新型储能一体化装置能够以更低成本实现新能源友好并网，有助于推动新能源的广泛应用和可持续发展。EA

（收稿日期：2025-08-25）

参考文献

[1] 区彩娟．新能源发电系统中储能技术的集成与优化应用研究[J]．光源与照明，2024(10)：225-227．

[2] 李艳，张磊．新能源并网对电力系统电能质量的影响及应对策略[J]．光源与照明，2024(1)：234-236．

[3] 肖先勇，赵禾畦，李成鑫．园区级-设备级电压暂降协同治理优化方案及其投融资策略[J]．电力自动化设备，2020，40(5)：157-164．

[4] 张炀，马伟哲，程韧俐，等．基于DIgSILENT的风光储微电网系统对电网安全稳定影响分析[J]．南方能源建设，2018，5(S1)：1-6．

[5] 童孙建．探究新能源并网对电能质量的影响及改进对策[J]．电气技术与经济，2023(6)：141-143．

[6] 彭可心，王学庆，孟鑫，等．基于虚拟健全的有源电力滤波器容错控制[J]．电力电子技术，2023，57(4)：46-51．

[7] 袁佳歆，许顺凯，余梦泽，等．一种配电网多线路混合式统一潮流控制器[J]．电力工程技术，2023，42(1)：2-10．

[8] 江友华，刘弘毅，叶尚兴，等．考虑电压质量及灵活性的高比例新能源配电网储能-无功优化配置[J]．电力建设，2023，44(09)：68-79．

[9] 李承泽，刘文霞，张艺伟，等．基于不对称网架信息的城市电网蓄意攻击关键节点辨识[J]．中国电机工程学报，2023，43(21)：8230-8243．

[10] 王建，李晓庆，迟恩先，等．高比例新能源配电系统电能质量与储能一体化应用[J]．电气应用．2025，44(06)：29-33

[11] 钟俊琛．新能源并网对电能质量的影响及改进对策分析[J]．光源与照明，2022(6)：220-222．

[12] 王群，姚为正，刘进军，等．谐波源与有源电力滤波器的补偿特性[J]．中国电机工程学报，2001，21(2)：16-20．

[13] 王浩哲，丁爱飞，陆继翔，等．计及新能源接入的地区电网人工智能无功优化[J]．电网与清洁能源，2023，39(1)：133-142．

[14] 钟俊琛．新能源并网对电力系统电能质量的影响[J]．集成电路应用，2023，40(3)：184-185．

[15] 舒印彪，陈国平，贺静波，等．构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]．中国工程科学，2021，23(6)：61-69．

[16] 赵丽萍．高速铁路与风电场相互作用及其对电网电能质量的影响[D]．北京：华北电力大学，2022．

[17] 李建宜，李鹏，徐晓春，等．基于综合概率模型与深度学习的智能电网功率-电压映射方法[J]．电力建设，2022，43(2)：37-44．