

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240530

水电机组调相运行与新能源发电协同优化技术研究

齐 郑, 吉苏朋

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 新能源直流外送系统发生直流闭锁后会产生暂态过电压, 严重限制了系统内新能源机组的出力。针对这一问题, 分析了新能源直流外送系统发生直流闭锁后产生暂态过电压的机理及其对新能源消纳的影响, 提出了水电机组调相运行与新能源发电协同优化技术。以系统运行经济性最优为优化目标, 考虑暂态过电压等约束, 建立了水电机组调相运行与新能源发电协同优化模型。利用改进粒子群算法进行寻优, 得到水电机组和新能源机组的优化运行方案。根据某地区实际电网搭建仿真算例, 仿真计算结果表明所提模型及方法不仅能促进新能源的消纳, 而且能有效抑制新能源直流外送系统的暂态过电压, 使系统运行的经济性、安全性得到显著提升。

关键词: 水电机组; 暂态过电压; 新能源直流外送; 粒子群算法

Synergistic optimization of phase modulation operation of hydropower units and power generation of new energy units

QI Zheng, JI Supeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Following DC blocking in the new energy DC transmission system, transient overvoltage is generated, severely constraining the output of new energy units within the system. To address this issue, this paper examines the mechanisms behind transient overvoltage resulting from DC blocking in new energy DC transmission systems and their effects on new energy integration. Additionally, it introduces a coordinated optimization technique for integrating phase adjustment operations of hydroelectric units with new energy generation. A collaborative optimization model is established for the coordinated optimization of phase modulation operations of hydroelectric units and new energy generation, aiming to maximize the economic efficiency of system operations while considering constraints such as transient overvoltage. The traditional particle swarm algorithm is enhanced, and the improved algorithm is used to optimize the operational plans for both hydroelectric and new energy units. Based on a simulation example of a specific region's actual power grid, the results demonstrate that the proposed model and method not only facilitate the integration of new energy but also effectively mitigate transient overvoltage in the new energy DC transmission system. This results in significant enhancements to both the economic efficiency and safety of system operations.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2601501).

Key words: hydropower units; transient overvoltage; new energy DC transmission; particle swarm algorithm

0 引言

不同于以火电机组为主的传统电力系统, 以风电、光伏等新能源电源为主的新型电力系统运行特性发生了显著变化, 带来了许多新问题, 暂态过电压是亟需解决的重要难题之一^[1]。由于新能源及直流输电均不具备动态无功支撑能力, 新能源经直流

外送系统, 调压能力欠缺, 直流线路在换相失败后的大量无功盈余会引起送端系统过电压^[2-5]。新能源场站的大量电力电子设备对暂态过电压的耐受能力较弱, 在故障时极易发生大面积脱网, 给新型电力系统的安全稳定运行带来巨大挑战^[6]。

利用无功补偿装置, 如 SVC、SVG 和同步调相机, 能够降低无功盈余带来的影响, 快速有效地降低暂态过电压, 增大新能源的接入容量^[7-12]。但安装上述设备投资较大, 经济性较差。在我国西部地

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2601501)

区, 新能源直流送端系统周边往往存在大量水电站。可通过改造使得水电机组具备调相运行的功能, 提升水电机组的无功支撑和抑制暂态过电压的能力, 从而提高新能源的消纳水平^[13-14]。利用水电机组调相的方法具有建设成本低, 节约土地资源, 变压器和电气二次系统附加投入低的优势。

目前国内外对于水电机组调相运行的研究主要聚焦于提高水电机组的调相性能。文献[15]对比了几种常见水电机组调相方式的优劣, 并筛选出两种工程上最有可行性的方案: 排水调相和压水调相; 文献[16-18]指出传统水电机组压水调相难以在时间尺度上满足直流闭锁故障场景下的调压需求, 并提出了一种改善水电机组调相性能的控制策略。此外, 还有一些研究探讨了水电调相技术与电力系统调度、稳定性等方面的关系。文献[19]量化了水电机组调节成本, 进而构建了费用因子较完备的多能互补发电效益评价方法, 并将其应用于水风互补系统发电效益研究; 文献[20]基于水电机组深度进相能力, 提出了水电站与换流站之间的进相协调控制策略, 做到在不同过电压幅值情况下调整水电进相深度, 提高对暂态过电压的抑制效果; 文献[21]分析了在新型电力系统中水电机组调相运行的必要性, 通过仿真实验验证了将现有水电机组改造, 切换为调相运行的可行性。但是针对水电机组调相运行抑制暂态过电压, 以及水电机组调相运行与新能源发电协同优化方面的研究比较少。

本文首先分析了新能源经直流外送系统产生暂态过电压机理以及利用水电机组调相运行抑制过电压原理。然后建立了水电机组调相运行与新能源发电协同优化模型, 以系统运行的综合性能达到最优为优化目标, 以限制暂态过电压为重要约束条件。采用改进粒子群算法进行优化计算, 提高运算速度和收敛性。最后对西北某地区实际电网进行仿真分析, 充分验证了所提出模型及方法的正确性。

1 直流闭锁导致的暂态过电压产生机理及对新能源消纳的影响

1.1 直流闭锁后暂态过电压产生的原因

新能源经直流外送系统如图 1 所示, 由于新能源场站和高压直流系统调压能力欠缺^[22], 因此在新能源集群地区, 交直流故障非常容易引起暂态过电压。

新能源大量接入直流外送系统产生暂态过电压的原因有两点: 一是发生直流换相失败引起直流

闭锁后, 直流输送的有功减少为 0, 而滤波器未退出导致直流送端无功补偿过剩, 过剩的无功流入交流电网导致换流母线产生暂态过电压^[23]; 二是发生交、直流故障后, 新能源进入低电压穿越运行状态, 发出较大的无功电流, 当故障消失后过多的无功电流不能立即减少, 从而引起暂态过电压^[24]。经研究表明, 新能源直流外送系统中换相失败后直流闭锁导致的暂态过电压的幅值更高^[25], 因此本文重点研究这种情况。

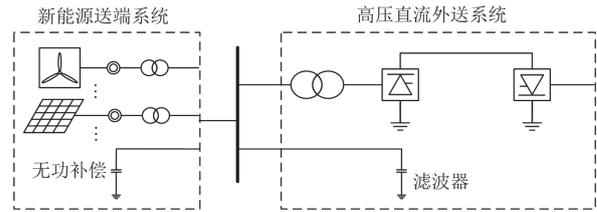


图 1 新能源直流外送系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of new energy DC transmission system

1.2 直流闭锁后暂态过电压对新能源消纳的影响

当前我国通常通过直流输电系统将大规模新能源场站发出的电力汇集后, 经由各级变电站输送到远处的负荷中心。实际新能源直流外送系统可以用图 2 所示的等效系统来简化。

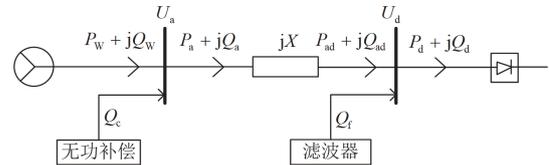


图 2 新能源直流外送等效系统

Fig. 2 Equivalent system for DC transmission of new energy

图 2 中: U_a 为新能源场站接入母线电压; U_d 为整流站交流母线电压; $P_w + jQ_w$ 为新能源场站输出功率; $P_a + jQ_a$ 为线路首端传输功率; $P_{ad} + jQ_{ad}$ 为线路末端传输功率; $P_d + jQ_d$ 为直流系统消耗的功率; Q_c 为新能源场站侧无功补偿设备注入电网的无功功率; Q_f 为整流站滤波器发出的无功功率; X 为新能源场站和整流站之间线路和变压器电抗之和。

通常从发生直流闭锁故障到切除整流站多余滤波器之前的 0.7 s 内, 整流站交流母线会产生过电压, 在 0.7~0.8 s 切除滤波器后电压回落。通过分析图 2 中直流闭锁后的情况, 可以利用电压变化、无功功率变化以及系统短路容量之间的关系来近似计算整流站交流母线和新能源场站的暂态过电压幅值。

$$\begin{cases} U'_d = U_d + \Delta U_d = U_d + \frac{\Delta Q_{ad} + \Delta Q_f - \Delta Q_d}{S_d} \\ U'_a = U_a + \Delta U_a = U_a + \frac{\Delta Q_w + \Delta Q_c - \Delta Q_a}{S_a} \end{cases} \quad (1)$$

式中： U'_d 为直流闭锁后换流站的电压； U'_a 为直流闭锁后新能源场站的电压； S_d 为整流站短路容量； S_a 为新能源场站短路容量； Δ 表示变化量。

直流闭锁故障发生后，有功功率传输和无功功率消耗均降为 0，即直流无功在故障发生后变化量 ΔQ_d 为

$$\Delta Q_d = -Q_d \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)可知，当新能源场站发出的有功功率和整个送端系统直流外送功率增大时，直流闭锁后的 $-\Delta Q_d$ 随之增大，整流站交流母线和新能源场站母线的暂态过电压也会增大。

为了抑制直流闭锁后的暂态过电压，现场实际运行时不得不降低新能源场站出力，减少直流送出，导致了弃风弃光，不利于新能源的消纳。因此需要采取措施抑制直流闭锁后产生的过电压，从而在保证系统运行安全的情况下让新能源场站输出更多有功功率，促进新能源的消纳。

2 水电机组调相运行抑制过电压机理

本文提出通过改造送端系统部分水电机组，使其运行在调相工况，从而达到抑制暂态过电压的目的。

水电机组调相运行可以采用压水调相和排水调相两种方式。压水调相利用压水装置向转轮室内压入空气，使得水位快速降低至转轮以下，达到降低转轮阻力和有功功率的目的，其优点是转换至调相运行方式非常迅速，缺点是需要增加压水设备。排水调相需要打开水轮发电机排水阀，等待排水完毕，再利用启动系统帮助水轮发电机并网后调相运行，其优点在于不需要增加设备，缺点是排水时间长，转换至调相运行方式慢。

按照发电机参考方向的惯例并忽略定子绕组电阻，水电机组调相运行时调相机电气相量关系如图 3 所示。

图 3 中： \dot{U} 为升压变压器高压侧电压； \dot{U}_t 为水电机组的机端电压； \dot{E}_q 为 q 轴感应电动势； \dot{E}'_q 为 q 轴虚拟电动势； \dot{E}''_q 为 q 轴次暂态感应电动势； \dot{I} 为升压变压器高压侧电流； X_d 、 X_q 分别为 d 、 q 轴电抗； X''_d 为 d 轴次暂态电抗； X_k 为连接水电机组的变压器等值电抗。

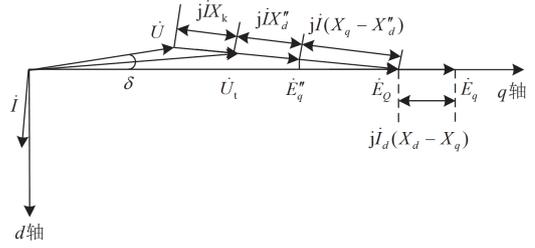


图 3 水电机组调相工况电气相量图
Fig. 3 Electrical phasor diagram of hydroelectric unit under phase adjustment condition

系统故障后水电机组的无功功率变化量 ΔQ_k 可以表示为

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_{k0} = u i_d - u_0 i_{d0} = (u_0 + \Delta u)(i_{d0} + \Delta i_d) - u_0 i_{d0} = u \Delta i_d + \Delta u i_{d0} \quad (3)$$

式中： Q_k 为故障后水电机组无功输出量； Q_{k0} 为水电机组无功输出的初始量； i_d 为水电机组电流的 d 轴分量； i_{d0} 为 d 轴电流的初始量； Δi_d 为故障后 d 轴电流的变化量； u 为水电机组的机端电压； Δu 为水电机组的机端电压变化量； u_0 为水电机组的初始机端电压。

水电机组调相运行时对于暂态过电压的响应分为两阶段：第一阶段是次暂态过程中基于电机自身特性响应机端电压变化，该响应为电磁作用的自发响应；第二阶段是暂态过程中励磁系统的控制响应，该响应的延时约为 25 ms。

1) 根据第一阶段中水电机组的自发响应过程可得

$$\Delta i_d = -\frac{\Delta u}{X''_d + X_k} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)，得到次暂态过程中水电机组瞬时无功功率变化量 ΔQ_k 为

$$\Delta Q_k = -\frac{u \Delta u}{X''_d + X_k} + \Delta u i_{d0} \quad (5)$$

故障发生后母线电压过高，由式(5)可知 $\Delta Q_k < 0$ ，这意味着调相运行的水电机组在故障发生后的次暂态该过程中可以吸收无功盈余。结合式(1)可知，上述水电机组的影响可以有效抑制直流闭锁引起的暂态过电压。

2) 在第二阶段中，根据水电机组调相运行时的励磁控制特性可得

经推导可得

$$\Delta Q_k = -(h(t)u - i_{d0})\Delta u \quad (6)$$

式中， $h(t)$ 为与励磁控制系统参数和时间相关的变量。

不计 i_{d0} , 由式(6)可得 $\Delta Q_k < 0$, 这意味着调相运行水电机组在故障发生后的暂态过程中可以吸收直流闭锁导致的无功盈余, 从而有效抑制暂态过电压。

在实际应用中通过对式(6)中励磁参数和控制策略进行优化, 使水电机组能够更快速地吸收过剩的无功功率, 提高抑制过电压的能力。

3 水电机组调相运行与新能源发电协同优化技术

3.1 优化模型建立

水电机组调相运行能够降低暂态过电压, 从而增加新能源场站出力, 减少弃风弃光, 提高经济收益。但是调相运行会造成弃水, 牺牲了水电机组发电量。因此需要对调相容量进行深入分析, 实现水电机组调相运行与新能源发电的协同优化。

3.1.1 目标函数

本文构建的优化目标函数从经济性和安全性两个方面考虑, 将部分水电机组运行在调相工况, 在抑制系统暂态过电压的同时, 保证有功输出的综合经济性最优。

据此建立的优化配置目标函数为

$$F = \sum_{k=1}^{24} f^k \quad (7)$$

式中: F 为新能源直流外送系统一天内的综合收益; f^k 为新能源直流外送系统一天中第 k 个小时的综合收益。

$$f^k = f_1^k(P_1^k, \dots, P_{N_G}^k) - \xi_2^k f_2^k(Q_1^k, \dots, Q_{N_H}^k) - \xi_3^k f_3^k(P_1^k, \dots, P_{N_G}^k, Q_1^k, \dots, Q_{N_H}^k) \quad (8)$$

式中: P_i^k 表示第 i 个新能源场站在第 k 个小时的有功功率, 其上限可根据典型日出力曲线计算得到; Q_i^k 表示第 i 个水电站在第 k 个小时的调相运行的水电机组容量; f_1^k 表示第 k 个小时整个送端系统中新能源有功功率的总和; f_2^k 表示第 k 个小时所有水电机组因调相运行而损失的有功出力; f_3^k 表示第 k 个小时新能源外送系统的送端过电压指标; N_G 为新能源场站节点数量; N_H 为水电站节点数量; ξ_2^k 为罚函数因子, 体现了水电单位利润和新能源发电单位利润之间的差异, 如果取较大数值则表示新能源上网电价较低, 反之则表示新能源上网电价较高, 取值范围为 $[0, 3]$; ξ_3^k 为罚函数因子, 体现了对电压安全性的重视程度, 如果取值较大则意味着目标函数更加重视抑制暂态过电压的效果, 取值范围为 $[0, 10000]$ 。

f_1^k 的计算公式为

$$f_1^k = \sum_{i=1}^{N_G} P_i^k \quad (9)$$

f_2^k 的计算公式为

$$f_2^k = \sum_{i=1}^{N_H} K_i k_i Q_i^k \quad (10)$$

式中: k_i 表示第 i 个水电站中机组调相运行时少发的有功功率与调相运行消耗的有功功率之和除以水电机组的调相运行容量; K_i 为 0 或 1。

在枯水期水电站内会有一部分水电机组处于空载工况, 这部分水电机组调相运行时不会产生有功损失, 因此, 当 $k_i Q_i^k$ 小于该水电站内空载工况的水电机组容量时, K_i 为 0, 当 $k_i Q_i^k$ 大于空载工况的水电机组容量时, K_i 为 1。在丰水期时, 本文默认水电站的水电机组都处于发电工况, 故丰水期 K_i 为 1。

如前文所述, 为了保证新能源设备的安全, 不仅要求暂态过电压在最大值范围内, 还应该让其尽可能小, 因此本文将暂态过电压抑制效果作为目标函数之一。工程上常用二元表判据来检验目标暂态电压是否超出系统所能承受的最大范围^[26], 过电压二元表 $[V, t]$ 的定义为电压高于 V 时能持续的最长时间, 但是该方法无法定量分析暂态过电压的严重程度。根据多个过电压二元表可以建立暂态过电压临界时间图, 用来反映不同程度过电压下的临界持续时间。如图 4 所示, 依据暂态过电压临界时间图的纵坐标, 可以将节点电压曲线与横轴围成的区域划分为多个小区域。

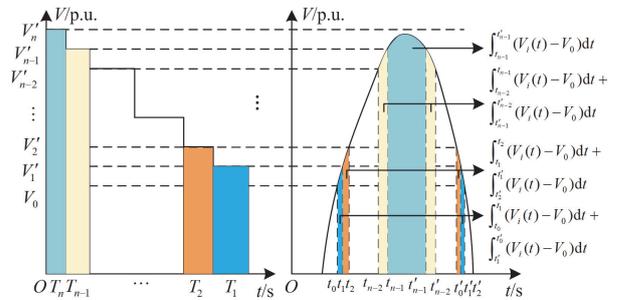


图 4 暂态过电压区域划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the division of the transient overvoltage area

根据图 4 所示的各区域划分, 定义 Γ_i 为第 i 个节点处的暂态过电压严重指标, 表示为

$$\Gamma_i = \frac{\int_{t_{n-1}}^{t_n} (V_i(t) - V_0) dt}{V_n' T_n} + \frac{\sum_{j=0}^{n-2} \int_{t_j}^{t_{j+1}} (V_i(t) - V_0) dt + \int_{t_{j+1}}^{t_j'} (V_i(t) - V_0) dt}{V_{j+1}' T_{j+1}} \quad (11)$$

式中： V_0 表示系统正常运行时的节点电压标么值，一般设为1.0； $V_i(t)$ 表示 t 时刻，第 i 个节点处的电压； V'_j 、 T_j 分别表示过电压二元表中的电压门槛值和与之对应的最大承受时间； t_j 、 t'_j 表示方程 $V_i(t) = V'_j$ 的两个解，其中 $t_j < t'_j$ 。

系统综合暂态过电压严重性指标 Γ 为

$$\Gamma = \sum_{i=1}^N \gamma_i \Gamma_i \quad (12)$$

式中： γ_i 为节点的权重系数； N 为系统节点个数。

根据上文定义的指标，可以将第 k 个小时中送端新能源系统的暂态过电压的严重程度 f_3^k 定量表示为第 k 个小时的系统综合暂态过电压严重性指标。

$$f_3^k = \Gamma = \sum_{i=1}^{N_h} \gamma_i \Gamma_i \quad (13)$$

本文构建水电机组调相功能与新能源发电协同优化的多目标函数 $\max F$ ，既考虑了因水电机组调相运行增加的新能源发电，又考虑到水电机组损失的有功功率，同时还考虑到了暂态过电压的严重程度，本质上是多目标寻优问题。

3.1.2 约束条件

1) 等式约束条件

$$\begin{cases} P_{Gi} + P_{dci} - P_{Di} = U_i \sum_{j=1}^N U_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}] \\ Q_{Gi} + Q_{dci} - Q_{Di} = U_i \sum_{j=1}^N U_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij}] \end{cases} \quad (14)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电机的有功功率和无功功率； P_{dci} 、 Q_{dci} 分别为直流输电的有功功率和无功功率； P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为负荷节点的有功功率和无功功率； U_i 、 U_j 和 θ_i 、 θ_j 分别为节点 i 和 j 的电压和相角； G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间的支路电导和电纳。

2) 不等式约束条件

变量约束包括状态变量约束和控制变量约束。其中状态变量包括稳态线路传输功率 P_{Li} 、稳态节点电压幅值 U_i 等；控制变量包括新能源场站有功功率 P_i^k 和水电机组调相运行的容量 Q_i^k 。

状态变量约束为

$$\begin{cases} P_{Li}^{\min} < P_{Li} < P_{Li}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_L \\ U_i^{\min} < U_i < U_i^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_G \end{cases} \quad (15)$$

控制变量约束为

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} < P_i^k < P_{Gi}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_G \\ Q_{Hi}^{\min} < Q_i^k < Q_{Hi}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_H \end{cases} \quad (16)$$

式中： P_{Li}^{\max} 、 P_{Li}^{\min} 和 U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 分别为稳态线路传输功率和节点电压的上下限； P_{Gi}^{\max} 、 P_{Gi}^{\min} 和 Q_{Hi}^{\max} 、

Q_{Hi}^{\min} 分别为新能源场站出力和水电机组调相运行的容量上下限。

虽然在前文目标函数中以罚函数的形式对暂态过电压进行约束，但是考虑到暂态过电压必须在规定的限制范围以内，因此还需要设置硬性约束条件。根据相关规程，暂态过电压的约束为

$$U_i'^{\max} < 1.35 \text{ p.u.}, i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

式中， $U_i'^{\max}$ 为暂态过电压的最大值。

3.2 基于改进粒子群算法的优化方法

3.2.1 改进粒子群算法

PSO算法的基本原理是由 n 个粒子在 D 维空间以一定速度飞行来寻求最优解。其中每个粒子代表一种可能解，粒子的当前速度决定了粒子下一时间的速度。 n 个粒子共同决定粒子群的当前位置。在飞行过程中，单个粒子根据自身和粒子群的情况不断修正自身的飞行速度和方向，最终找到最优解。

粒子群算法的基本公式^[27]为

$$\begin{cases} V_m(k+1) = \omega V_m(k) + \alpha_1 \gamma_1 (p_{\text{best},m} - X_m(k)) + \alpha_2 \gamma_2 (g_{\text{best}} - X_m(k)) \\ X_m(k+1) = V_m(k+1) + X_m(k) \end{cases} \quad (18)$$

式中： $X_m(k)$ 表示第 m 个粒子在 k 次迭代后的位置； $V_m(k)$ 表示第 m 个粒子在 k 次迭代后的速度； ω 表示惯性权重系数； α_1 表示确定粒子达到自身最佳位置的学习因子； α_2 表示粒子群中任何粒子到达自身最佳位置的全局学习因子； γ_1 与 γ_2 为[0,1]之间的随机数，主要作用是保持粒子群算法的群体多样性； $p_{\text{best},m}$ 表示粒子 m 达到的最佳位置； g_{best} 表示粒子群中任何粒子获得的最佳位置。

粒子群在求解空间的一次位置寻优移动就是一次迭代，此迭代过程重复进行，直到粒子达到全局最优位置或达到最大迭代次数。

粒子群算法中惯性权重对寻优搜索的影响较大，本文在搜索初始阶段，设定惯性权重取较大值，可以提高寻优搜索的效率，在搜索中后期，随着搜寻结果的不断优化，采用改进后的惯性权重公式使惯性权重随着搜索进行不断减小，从而进一步提高寻优搜索的准确性。改进后的惯性权重系数 ω 表示为

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \frac{k}{k_{\max}} \quad (19)$$

式中： ω_{\max} 为初始惯性权重系数； ω_{\min} 为迭代至最大次数时的惯性权值系数； k_{\max} 为最大迭代次数。

基础PSO算法在更新速度公式中使用 $\omega V_m(k)$ ，

假定只有粒子第 k 步的速度会影响粒子第 $k+1$ 步的速度更新, 但是任何生物行为都存在惯性或是延时性, 即第 $k+1$ 步的速度更新不仅受第 k 步的影响, 也会受到 $k-1, k-2, \dots, 0$ 步的影响。所以按照式(20)更新粒子速度。

$$V_m(k+1) = \omega \sum_{n=0}^k V_m(n) + \alpha_1 \gamma_1 (p_{\text{best},m} - X_m(k)) + \alpha_2 \gamma_2 (g_{\text{best}} - X_m(k)) \quad (20)$$

由于第 k 步的影响比第 $k-1$ 步的影响更显著, 所以加上衰减系数, 得到更新公式为

$$V_m(k+1) = \omega \sum_{n=0}^k \eta^{n-k} V_m(n) + \alpha_1 \gamma_1 (p_{\text{best},m} - X_m(k)) + \alpha_2 \gamma_2 (g_{\text{best}} - X_m(k)) \quad (21)$$

式中, η 为衰减因子, $\eta \in (0, 1)$, 若数值过大, 则过往速度影响太大, 过小反之, 因此经过调试, 本文取 $\eta = 0.15$ 。

在更新粒子位置时, 基础算法使用 $X_m(k+1) = V_m(k+1) + X_m(k)$, 让速度完全引导位置更新, 这样容易导致局部收敛。本文结合 levy 飞行的优点: 其一, 步长根据 levy 分布生成, 而 levy 分布是一种长尾分布, 具有比较大的方差, 使得步长以更大的幅度变化; 其二, levy 的飞行方向是通过随机选择一个角度来确定的, 飞行路线不再是简单的直线, 而是一个随机曲线。这两者可以有效避免粒子更新导致的局部收敛。更新公式为

$$X_m(k+1) = V_m(k+1) \oplus \text{Levy}(\beta) + X_m(k) \quad (22)$$

式中, $\text{Levy}(\beta)$ 是 levy 随机步长, 可通过式(23)计算。

$$\begin{cases} s = \frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \\ u \sim N(0, \sigma^2) \\ v \sim N(0, 1) \\ \sigma = \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\beta \Gamma(\frac{1+\beta}{2}) 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \end{cases} \quad (23)$$

3.2.2 基于改进粒子群算法的优化方法

本文利用上述改进粒子群算法进行计算, 输入变量是各个新能源场站出力, 以及每个水电站中调相运行的水电机组容量。输出变量是式(7)构造的目标函数 $F = \sum_{k=1}^{24} f^k$ 。

具体流程如图 5 所示。每次计算根据直流送端系统内各个新能源场站出力、新能源直流外送系统内每个水电站中调相运行的水电机组容量进行仿真计算。根据故障情况下的电压曲线计算系统暂态综合

过电压严重性指标值, 计算出目标函数的值。若目标函数值不满足收敛条件且未达到最大迭代次数时, 利用式(18)一式(23)更新粒子的速度和位置, 继续迭代直至满足收敛条件或达到最大迭代次数。

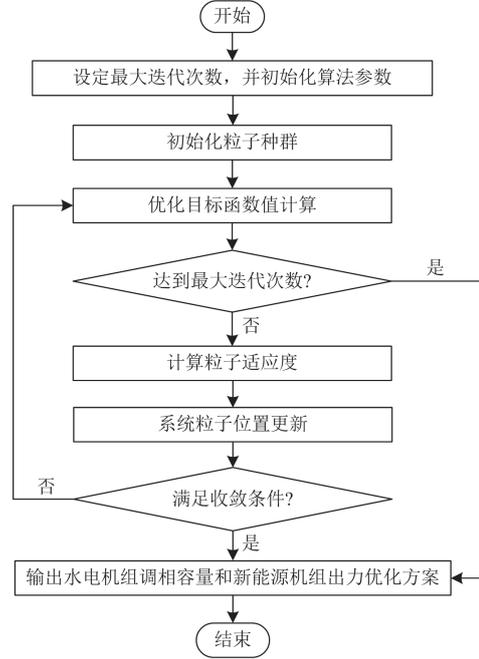


图 5 水电与新能源协同优化求解方法流程图

Fig. 5 Flow chart of the collaborative optimization method of hydropower and new energy

4 算例分析

图 6 是西北某地区的电网, 该电网直流外送额定功率为 8000 MW, 额定电压为 ± 800 kV。系统内设置了 14 个新能源发电厂和 3 个水电机组分布在 A、B、C 三个 750 kV 换流站周围。其中风电场站 6 处, 总容量为 3500 MW; 光伏场站 8 处, 总容量为 7900 MW; 3 个水电站总容量为 2400 MW, 单台机组 200 MW, 各场站具体容量如表 1 所示。

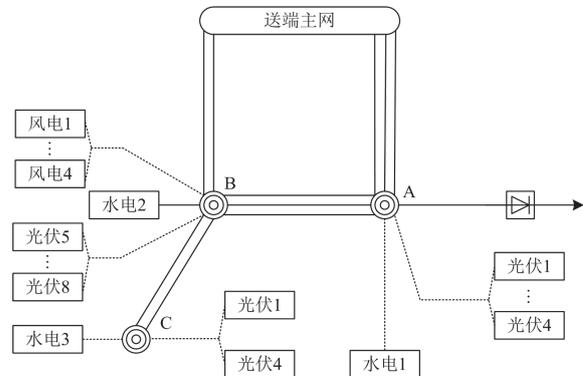


图 6 仿真算例网架图

Fig. 6 Simulation example network structure

表 1 系统中机组容量

Table 1 Capacity of the unit in the system

场站	风电 1	风电 2	风电 3	风电 4	风电 5	风电 6
容量/MW	150	800	200	1100	850	720
场站	光伏 1	光伏 2	光伏 3	光伏 4	光伏 5	光伏 6
容量/MW	850	920	1070	1210	850	720
场站	光伏 7	光伏 8	水电 1	水电 2	水电 3	
容量/MW	1280	1000	800	800	800	

本文使用 PSASP-Matlab 联合仿真技术, 解决水电机组调相运行和新能源发电出力协同优化的问题。具体做法: 1) 使用电力系统时域仿真软件 PSASP 进行系统时域仿真计算; 2) 用 Matlab 软件进行数据处理和优化算法的编写。由第 1 节可知, 新能源直流外送系统中换相失败后直流闭锁导致的暂态过电压的幅值更高, 因此仿真时设置故障为连续 2 次换相失败后第三次换相失败直流闭锁。各节点的过电压二元表如表 2—表 4 所示。

表 2 风电场站节点过电压二元表

Table 2 Binary table of overvoltage at wind farm nodes

暂态过电压/p.u.	1.1	1.15	1.2	1.3
最大持续时间/s	1.2	0.1	0.06	0.02

表 3 光伏场站节点过电压二元表

Table 3 Binary table of overvoltage at photovoltaic power station nodes

暂态过电压/p.u.	1.1	1.2	1.3	1.35
最大持续时间/s	2	1.5	0.15	0.05

表 4 新能源汇集站及变电站节点过电压二元表

Table 4 Binary table of node overvoltage of new energy gathering stations and substations

暂态过电压/p.u.	1.1	1.15	1.2	1.3
最大持续时间/s	2	1.5	0.15	0.05

根据调研可知, 水电机组调相运行的容量为正常运行时的 50%~70%, 故在本算例中 k_i 设置为 1.43。罚函数因子 ξ_2^k 的选择由水力发电的单位利润和新能源发电的单位利润决定。根据对暂态过电压的要求, 本算例中罚函数因子 ξ_3^k 设为 2000。迭代优化时, 设种群规模为 10; 加速度常数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.3$; 初始惯性权重系数 $\omega_{\max} = 0.9$ 。

1) 场景 1: 9 月份丰水期, 新能源上网电价较高, 取 $\xi_2^k = 1.1$ 。优化计算过程中目标函数值如图 7 所示, 随着迭代次数的增加目标函数值迅速上升然后逐渐趋于稳定, 最后的优化结果如表 5 和图 8—图 10 所示, 其中新能源场站全天出力以风电场站 1

和光伏场站 1 为例。

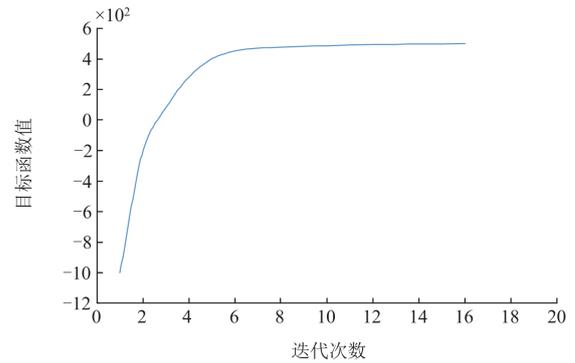


图 7 迭代结果曲线(场景 1)

Fig. 7 Curve of the iteration result (scenario 1)

表 5 场景 1 一天中各节点最大过电压

Table 5 The maximum overvoltage of each node in a day in scenario 1

场站	风电 1	风电 2	风电 3	风电 4	风电 5	风电 6
过电压最大值/p.u.	1.250	1.262	1.259	1.257	1.249	1.251
场站	光伏 1	光伏 2	光伏 3	光伏 4	光伏 5	光伏 6
过电压最大值/p.u.	1.280	1.279	1.277	1.282	1.279	1.280
场站	光伏 7	光伏 8	换流站 A	换流站 B	换流站 C	
过电压最大值/p.u.	1.282	1.276	1.281	1.274	1.279	

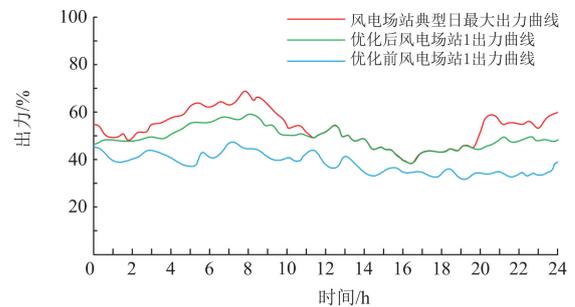


图 8 风电场站 1 出力曲线(场景 1)

Fig. 8 Output curve of wind farm 1 (scenario 1)

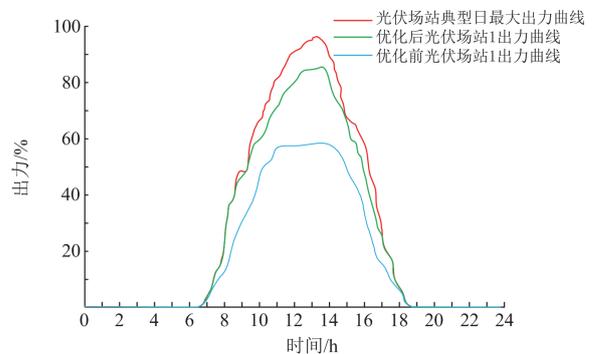


图 9 光伏电站 1 出力曲线(场景 1)

Fig. 9 Output curve of photovoltaic field 1 (scenario 1)

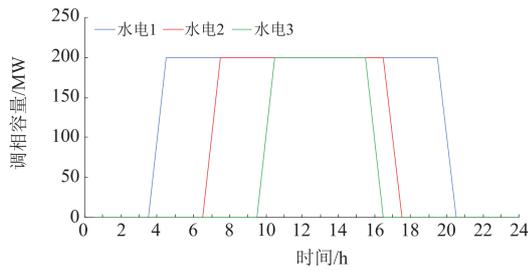
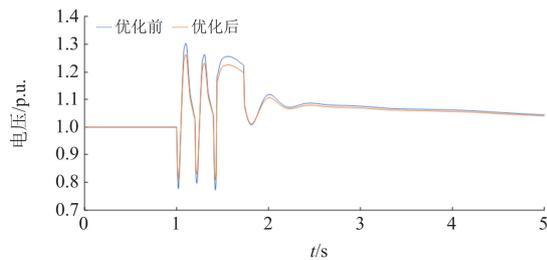


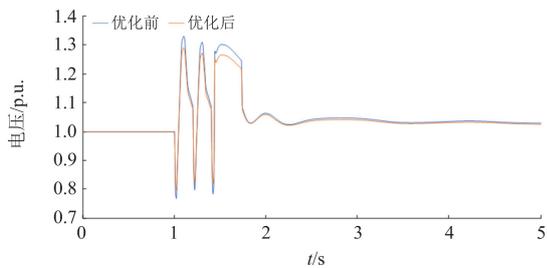
图 10 水电机组调相容量(场景 1)

Fig. 10 Phase regulation capacity of hydroelectric units (scenario 1)

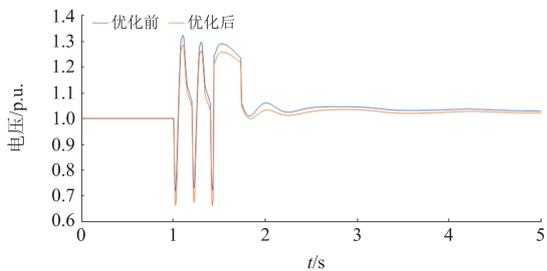
优化前后系统内主要节点的暂态过电压曲线如图 11 所示。由图 11 可知, 风电场站 1 的最高暂态过电压由优化前的 1.306 p.u. 降低至优化后的 1.264 p.u.; 光伏场站 1 的最高暂态过电压由优化前的 1.330 p.u. 降低至优化后的 1.291 p.u.; 换流站 B 的最高暂态过电压由优化前的 1.321 p.u. 降低至优化后的 1.286 p.u.。



(a) 风电场站 1 电压



(b) 光伏场站 1 电压



(c) 换流站 B 电压

图 11 典型节点暂态电压曲线(场景 1)

Fig. 11 Transient voltage curve of typical nodes (scenario 1)

由仿真实验可以得出以下结论: 在丰水期, 当新能源上网电价较高时, 应该尽量增加新能源场站出力。为此可以牺牲水电站发出的有功, 让部分水电机组运行在调相工况, 换取新能源场站出力的增加。

2) 场景 2: 9 月份丰水期, 新能源上网电价较低, 取 $\xi_2^k = 1.3$ 。优化计算过程中目标函数值如图 12 所示, 随着迭代次数的增加目标函数值迅速上升然后逐渐趋于稳定, 最后的优化结果如表 6 和图 13—图 15 所示, 其中新能源场站全天出力以风电场站 1 和光伏场站 1 为例。

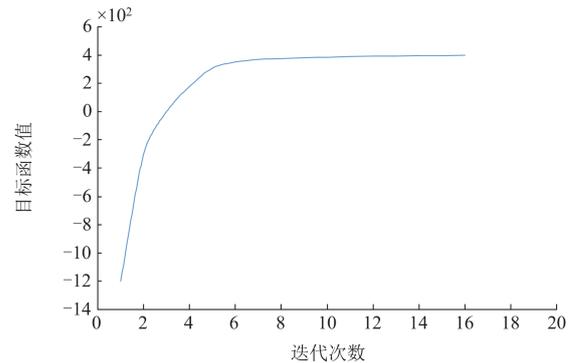


图 12 迭代结果曲线(场景 2)

Fig. 12 Curve of the iteration result (scenario 2)

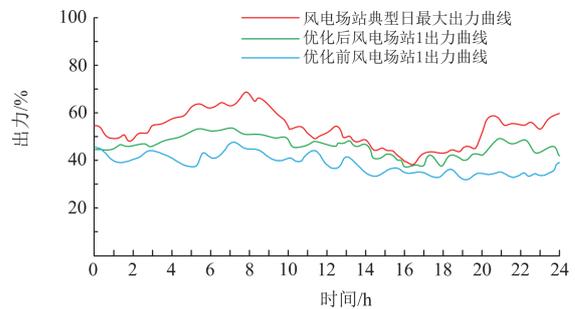


图 13 风电场站 1 出力曲线(场景 2)

Fig. 13 Output curve of wind farm 1 (scenario 2)

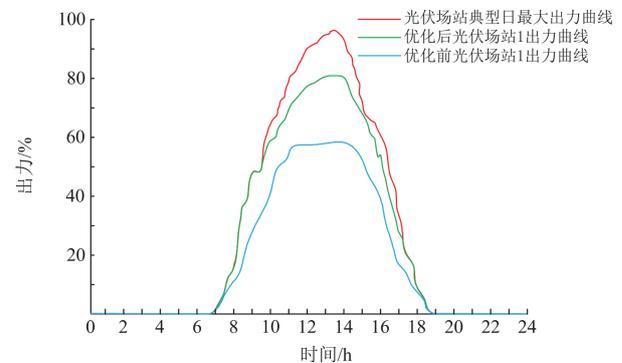


图 14 光伏场站 1 出力曲线(场景 2)

Fig. 14 Output curve of photovoltaic field 1 (scenario 2)

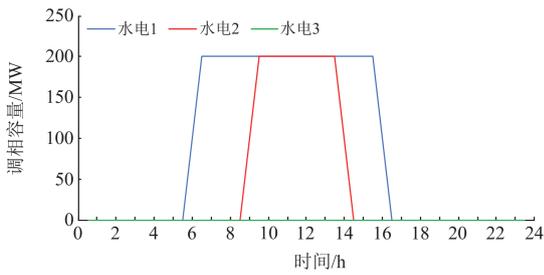


图 15 水电机组调相容量(场景 2)

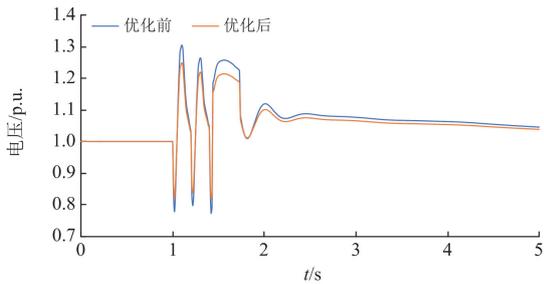
Fig. 15 Phase regulation capacity of hydroelectric units (scenario 2)

表 6 场景 2 一天中各节点最大过电压

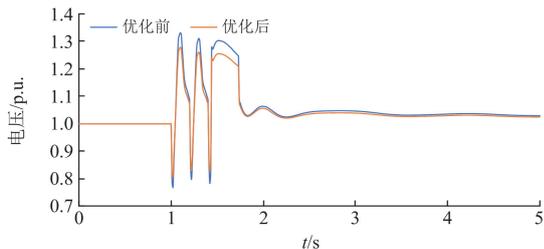
Table 6 The maximum overvoltage of each node in a day in scenario 2

场站	风电 1	风电 2	风电 3	风电 4	风电 5	风电 6
过电压最大值/p.u.	1.264	1.261	1.265	1.260	1.258	1.259
场站	光伏 1	光伏 2	光伏 3	光伏 4	光伏 5	光伏 6
过电压最大值/p.u.	1.291	1.279	1.287	1.288	1.287	1.292
场站	光伏 7	光伏 8	换流站 A	换流站 B	换流站 C	
过电压最大值/p.u.	1.282	1.296	1.281	1.286	1.289	

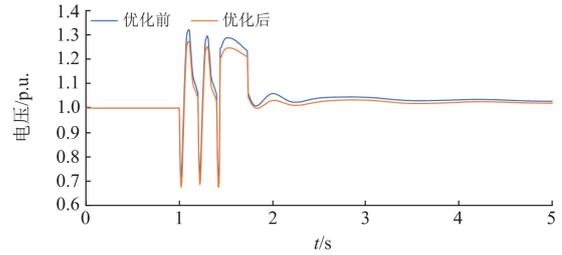
优化前后系统内主要节点的暂态过电压曲线如图 16 所示。由图 16 可知，风电场站 1 的最高暂态过电压由优化前的 1.306 p.u. 降低至优化后的 1.250 p.u.; 光伏场站 1 的最高暂态过电压由优化前的 1.330 p.u. 降低至优化后的 1.280 p.u.; 换流站 B 的最高暂态过电压由优化前的 1.321 p.u. 降低至优化后的 1.274 p.u.



(a) 风电场站 1 电压



(b) 光伏场站 1 电压



(c) 换流站 B 电压

图 16 典型节点暂态电压曲线(场景 2)

Fig. 16 Transient voltage curve of typical nodes (scenario 2)

由仿真实验可以得出以下结论：在丰水期，当新能源发电利润较低时，应让更多水电机组运行在发电工况。

3) 场景 3: 1 月份枯水期，新能源上网电价较高，取 $\xi_2^k = 1.1$ 。优化计算过程中目标函数值如图 17 所示，随着迭代次数的增加目标函数值迅速上升然后逐渐趋于稳定，最后的优化结果如表 7 和图 18—图 20 所示，其中新能源场站全天出力以风电场站 1 和光伏场站 1 为例。

优化前后系统内主要节点的暂态过电压曲线如图 21 所示。由图 21 可知，风电场站 1 的最高暂态过电压由优化前的 1.303 p.u. 降低至优化后的 1.244 p.u.; 光伏场站 1 的最高暂态过电压由优化前

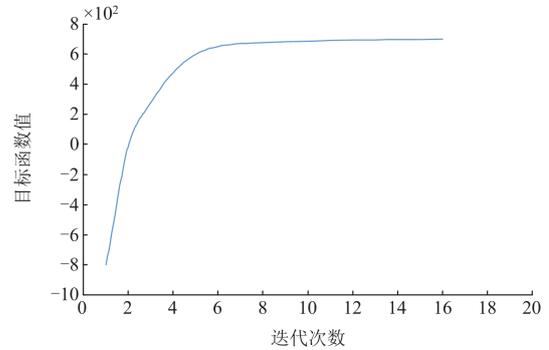


图 17 迭代结果曲线(场景 3)

Fig. 17 Curve of the iteration result (scenario 3)

表 7 场景 3 一天中各节点最大过电压

Table 7 The maximum overvoltage of each node in a day in scenario 3

场站	风电 1	风电 2	风电 3	风电 4	风电 5	风电 6
过电压最大值/p.u.	1.243	1.251	1.252	1.247	1.248	1.245
场站	光伏 1	光伏 2	光伏 3	光伏 4	光伏 5	光伏 6
过电压最大值/p.u.	1.278	1.279	1.281	1.279	1.276	1.289
场站	光伏 7	光伏 8	换流站 A	换流站 B	换流站 C	
过电压最大值/p.u.	1.281	1.275	1.271	1.270	1.275	

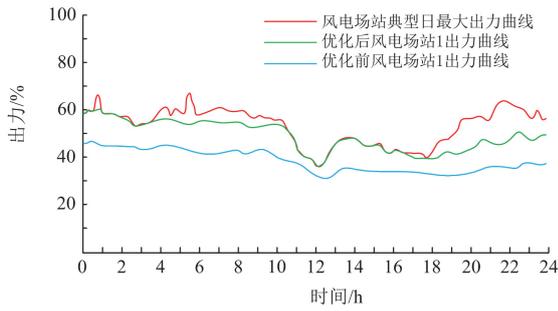


图 18 风电场站 1 出力曲线(场景 3)

Fig. 18 Output curve of wind farm 1 (scenario 3)

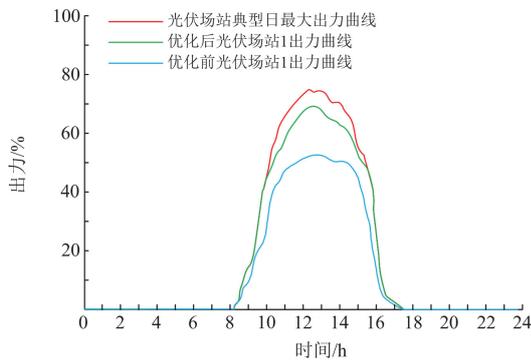


图 19 光伏场站 1 出力曲线(场景 3)

Fig. 19 Output curve of photovoltaic field 1 (scenario 3)

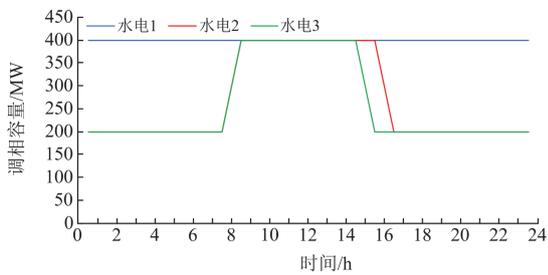


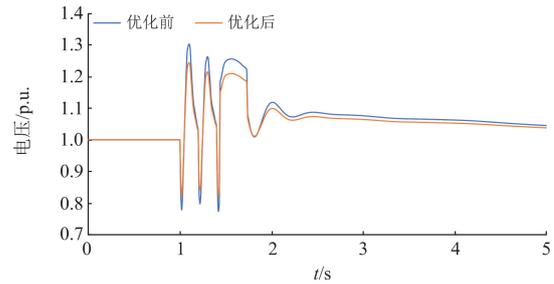
图 20 水电机组调相容量(场景 3)

Fig. 20 Phase regulation capacity of hydroelectric units (scenario 3)

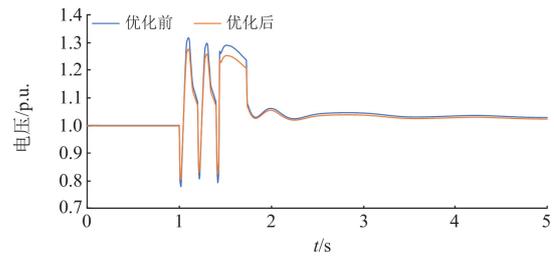
的 1.319 p.u. 降低至优化后的 1.278 p.u.; 换流站 B 的最高暂态过电压由优化前的 1.316 p.u. 降低至优化后的 1.270 p.u.。

仿真实验可以得出以下结论：在枯水期，因流量较小使得大型水电站有较多的机组空闲。此时水电机组最适合在调相工况下运行，提升新能源场站出力，提高整体运行的经济性与安全性。

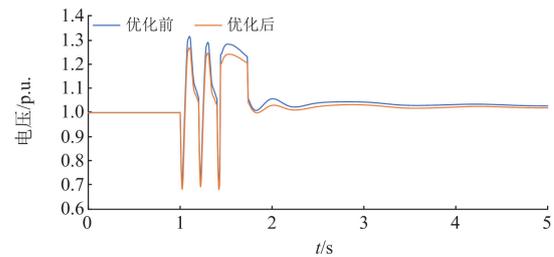
本文的优化模型没有考虑投资回收及水电机组在运行方式切换时的磨损问题，后续如果需要进行更为细致的优化计算，可以考虑这些因素改进优化模型。



(a) 风电场站 1 电压



(b) 光伏场站 1 电压



(c) 换流站 B 电压

图 21 典型节点暂态电压曲线(场景 3)

Fig. 21 Transient voltage curve of typical nodes (scenario 3)

5 结论

本文建立水电机组调相运行与新能源发电协同优化模型，以系统运行的综合性能最优为目标，使用改进粒子群算法对优化模型进行求解。经过仿真验证，得出以下结论。

1) 本文提出的方法能够促进新能源的消纳，同时能够有效抑制新能源直流外送系统的暂态过电压，提高了系统运行的经济性和安全性，具有更好的实用性。

2) 在丰水期，当新能源发电利润较高时，可以让部分水电机组运行在调相工况，增加新能源场站出力，获得最优的经济性；反之，当新能源发电利润较低时，应该让更多的水电机组运行在发电工况。在枯水期可以让大量空闲水电机组运行在调相工况，提高新能源场站出力。

3) 改进粒子群算法能够有效提高计算速度和收敛性，具有很好的实用性。

参考文献

- [1] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [2] 金吉良, 刘瑶, 白菁, 等. 风电直流送出系统换相失败特性分析及其抑制措施[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 74-82, 92.
JIN Jiliang, LIU Yao, BAI Jing, et al. Characteristics analysis of the commutation failure and its suppression measures of the wind power DC transmission system[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(3): 74-82, 92.
- [3] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [4] ZHOU C, WANG Z, JU P, et al. High-voltage ride through strategy for DFIG considering converter blocking of HVDC system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(3): 491-498.
- [5] 秦艳辉, 尹纯亚, 段青熙, 等. 直流近区系统故障下的暂态电压特性分析及支撑策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 169-177.
QIN Yanhui, YIN Chunya, DUAN Qingxi, et al. Research on transient voltage characteristics and support strategy under a fault occurred in the near-zone of HVDC sending system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 169-177.
- [6] NIU T, GUO Q, SUN H, et al. Autonomous voltage security regions to prevent cascading trip faults in wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1306-1316.
- [7] 李帛洋, 晁璞璞, 李卫星, 等. 风电经特高压直流送出系统的暂态过电压计算方法[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 11-18.
LI Boyang, CHAO Pupu, LI Weixing, et al. Transient overvoltage calculation method of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 11-18.
- [8] LIU J, XU Y, QIU J, et al. Non-network solution coordinated voltage stability enhancement with STATCOM and UVLS for wind-penetrated power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1559-1568.
- [9] CHI Y, XU Y, DING T. Coordinated var planning for voltage stability enhancement of a wind-energy power system considering multiple resilience indices[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2367-2379.
- [10] 汤奕, 赵丽莉, 郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 34-40.
TANG Yi, ZHAO Lili, GUO Xiaojiang. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 34-40.
- [11] 王顺亮, 谢洋, 马俊鹏, 等. 基于直流电流控制的特高压直流分层接入系统协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 167-178.
WANG Shunliang, XIE Yang, MA Junpeng, et al. Coordinated control strategy for a UHVDC hierarchical connection system based on DC current control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 167-178.
- [12] 杨松浩, 李秉芳, 赵天骐, 等. 新能源场站分布式同步调相机暂态功角失稳形态及机理[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 12-18.
YANG Songhao, LI Bingfang, ZHAO Tianqi, et al. Transient angle instability mode and mechanism of distributed synchronous condensers in renewable energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 12-18.
- [13] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2745-2755.
MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2755.
- [14] ZHU F, ZHONG P, XU B, et al. Short-term stochastic optimization of a hydro-wind-photovoltaic hybrid system under multiple uncertainties[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 214: 112902.
- [15] 郭强, 李志强. 同步调相机发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6050-6064.
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6064.
- [16] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy

- power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [17] 高本锋, 杨健, 宋胜利, 等. 抑制新能源经直流外送系统过电压的水电机组协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6212-6224.
GAO Benfeng, YANG Jian, SONG Shengli, et al. Coordinated control strategy of hydropower units for restraining overvoltage of renewable energy generation system integrated with HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6212-6224.
- [18] 林俐, 岳晓宇, 许冰倩, 等. 计及抽水蓄能和火电深度调峰效益的抽蓄-火电联合调峰调用顺序及策略[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 20-29.
LIN Li, YUE Xiaoyu, XU Bingqian, et al. Sequence and strategy of pumped storage-thermal combined peak shaving considering benefits of pumped storage and deep regulation of thermal power[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 20-29.
- [19] 李欢欢. 水轮发电机组安全评价及其调节特性对互补发电效益影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
LI Huanhuan. Safety assessment of a hydropower generation unit and its regulation effects on benefits of a multi-energy power system[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021.
- [20] 杨秀媛, 樊新东, 陈麒宇. 考虑振动区的水电厂控制策略及其在风水协同运行中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5433-5441.
YANG Xiuyuan, FAN Xindong, CHEN Qiyu. Control strategy of hydropower plant considering vibration region and its application in coordinated hydro and wind power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5433-5441.
- [21] PENG Q, ZHANG P, ZHOU J. Feasibility analysis of phase modulation operation of large hydropower units in a new power system[J]. Sichuan Hydro Power, 2023, 42(6): 116-119.
- [22] 张起瑞, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 抑制直流单极闭锁引起大规模风电机组脱网的直流控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3528-3536.
ZHANG Qirui, LI Fengting, YIN Chunya, et al. DC control strategy for suppressing large-scale WTG tripping caused by mono-polar block fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3528-3536.
- [23] XU X, YAN Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3236-3245.
- [24] LI Y, FAN L, MIAO Z. Wind in weak grids: low-frequency oscillations, subsynchronous oscillations, and torsional interactions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 109-118.
- [25] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.
HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.
- [26] 赵晋泉, 朱尧靓, 潘尔生, 等. 适用于大规模新能源接入直流送端系统的暂态过电压严重性指标研究[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 1-9.
ZHAO Jinquan, ZHU Yaoliang, PAN Ersheng, et al. Study on transient voltage rise severity index for the high renewable power-penetrated UHVDC sending-end power system[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 1-9.
- [27] 郭培, 陈波, 高云超, 等. 基于XGBOOST-PSO提高受端电网电压暂态稳定的发电机无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 148-158.
GUO Pei, CHEN Bo, GAO Yunchao, et al. A generator reactive power optimization method based on XGBOOST-PSO to improve the voltage transient stability of a receiving terminal network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 148-158.

收稿日期: 2024-05-01; 修回日期: 2024-07-11

作者简介:

齐 郑(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: qizheng319@126.com

吉苏朋(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: jsp.chn@outlook.com

(编辑 许 威)