第 50 卷 第 12 期：5563-5574 高电压技术 Vol.50, No.12: 5563-5574
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240669

考虑动态增容受限的光伏反向过载台区滚动优化策略研究

张轶炫[1,2]，田志曈[1,2]，杨博超[1,2]，刘谋海[3]，马叶钦[3]，鲁海亮[1,2]
（1. 电网环境保护全国重点实验室，武汉 430072；2. 武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072；
3. 国网湖南省电力有限公司，长沙 410118）

摘　要：随着双碳目标的提出，我国整县光伏大力发展。之前的低压配电网设计并未预料到大量的分布式光伏的接入，导致大量配电台区出现反向功率，甚至反向过载的问题。配置储能可以实现台区动态增容从而对过载有效治理，然而储能投资成本高，配置容量往往有限，无法彻底解决台区反向过载问题。因此，从过载对变压器寿命影响出发，提出动态增容受限下反向过载优化治理策略，并与现有的储能最大功率出力以及恒定功率均匀出力策略进行对比。其次，提出考虑反向功率严重时段整体特性的滚动时间窗选取方法，并制定合适的定变窗结合滚动调度策略。最后，利用加入混沌映射与精英反向学习的改进粒子群算法对本文所建立的反向过载优化治理模型进行求解，并对实际台区进行分析，验证了本文过载治理和滚动优化策略有效性。

关键词：配电台区；反向过载；变压器寿命；滚动调度；精英反向学习

Research on Rolling Optimization Strategy Considering the Dynamic Capacity Increase Limitation of Photovoltaic Reverse Overload Distribution Areas

ZHANG Yixuan[1,2], TIAN Zhitong[1,2], YANG Bochao[1,2], LIU Mouhai[3], MA Yeqin[3], LU Hailiang[1,2]
(1. State Key Laboratory of Power System Environmental Protection, Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410118, China)

Abstract: With the promotion of the dual-carbon goals, photovoltaic development across entire counties in China has surged. Previous designs of the low-voltage distribution network did not anticipate the integration of a large number of distributed energy sources, leading to problems of power inversion and even reverse overload. However, the energy storage investment cost is high, the configuration capacity is often limited, and the problem of reverse overload in the area cannot be completely solved. Consequently,we investigate the influence mechanism of overload on transformer life, propose an optimization strategy for managing reverse overload under capacity enhancement limitation, and compare the proposed strategy with the existing strategies of maximum power output and constant power uniform output in energy storage. Secondly, a rolling time window selection method considering the overall characteristics of the reverse power severe period is proposed, and a suitable fixed-variable window combined rolling scheduling strategy is formulated. Finally, an improved particle swarm optimization algorithm with chaotic mapping and elite reverse learning is used to solve the overload optimization governance model. The data in actual area are analyzed to verify the effectiveness of the overload control and rolling optimization strategy in this paper.

Key words: distribution area; reverse overload; transformer lifespan; rolling scheduling; elitist inverse learning

0　引言

在双碳目标引领下，分布式光伏装机容量不断上涨。2021 年 6 月 20 日国家能源局印发《关于整县屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》指出，拟在全国组织开展整县(市、区)推进屋顶分布式光伏开发试点工作，党政机关屋顶、公共建筑屋顶、工商业厂房、居民屋顶的光伏安装比例分别不低于 50%、40%、30%、20%[1]。随着新能源装机容量逐渐扩大，之前的电网设计并未预料到大量的分布式电源的接入需求，分布式光伏的逐步增长影响电网稳定和安全运行[2]，特别是对那些本身能力有限的农村电网。分布式光伏因其随机性、间歇性、波动性特点，给低压配电台区带来电压波动、电压越限

与反向功率等问题，很多台区返送电网功率甚至超过了台区变压器额定容量[3]，出现反向过载现象[4-5]。

若变压器始终保持较高的负载率，将严重影响变压器的寿命，严重时还会造成变压器烧毁[6]。目前针对变压器过载能力的研究主要是针对变压器热点温度的计算[7]。文献[8]利用仿真软件对油浸式变压器的温升进行了仿真验证。文献[9]从热点温度出发，对不同负载下油浸式配电变压器的过载能力做了研究。文献[10]提到可以利用 Arrhenius 理论对变压器寿命进行计算，得到严重过载情况下变压器故障概率也随之增加。然而目前缺乏考虑变压器寿命情况下台区反向过载治理问题研究。

目前提出有变压器扩容、调控负荷、弃光、配置储能等过载治理方案。通过配置储能，可以实现台区变压器的动态增容，降低负载率，在我国山东、湖南一些地区展开了部分试点应用。然而目前对储能的控制策略单一，工作模式简单，仅能实现每天充放电时段以及功率的简单设定，缺乏精细的优化控制。现有文献对光储联合优化系统做了大量的研究。文献[11]对新型电力系统下分布式储能的具体应用场景与优化配置的数学建模做了概述。文献[12]总结了储能系统在提升电力系统弹性能力方面的作用。文献[13]对储能在峰谷套利、波动平抑等方面的作用进行分析，并进行优化计算。然而目前缺少利用有限容量储能解决分布式光伏台区反向过载问题的研究，缺乏相应的优化运行策略。

目前多时间尺度调度研究较多。文献[14]对工业园区内考虑储能的综合能源系统进行日前调度。文献[15]提出了针对多元储能的能量中心系统的“日前-日内-实时”3 阶段优化调度方法，在提高经济性的同时实现能量的协调匹配。文献[16]提出了一种基于“日前调度-滚动调度-协调调度-自动发电控制”4 个阶段的优化调度策略。针对日内滚动调度，文献[17]对主动配电网有功无功出力进行定时间窗滚动计算；文献[18]提出利用不同时间尺度滚动周期，解决储能调度中“近视”、“远视”问题。然而目前没有针对滚动调度时间窗选取原则的深入分析，缺少针对反向过载治理的日内滚动策略研究。

对于滚动优化调度模型的求解，传统粒子群算法在解决此类问题时会遇到维数爆炸问题。文献[19]提出了自适应粒度学习分布式粒子群算法，能有效提升粒子在高维空间的搜索效率，但计算复杂度却明显增加。文献[20]提出了利用竞争机制进行改进的粒子群优化算法，即对于竞争中处于劣势的粒子，向优势粒子学习。文献[21]提出了基于等级的粒子群算法，其将粒子划分等级，由低等级向高等级学习。文献[22]引入了精英学习的思想，即通过学习种群中的优势个体来提高整个种群个体的优越性。以上方法策略虽然能解决粒子群算法在高维问题的收敛问题，但却很难协调粒子在求解空间的多样性。

综上分析，目前对低压配电台区反向过载问题的研究没有深入，缺少台区动态增容受限下反向过载优化治理策略和求解方法研究。因此，本文首先分析变压器寿命损耗与负载率的关系，提出动态增容受限下过载治理策略。其次，考虑反向功率严重时段整体特性，提出滚动时间窗的选取原则，制定合适的日内滚动策略。随后建立优化模型，利用改进粒子群算法对此非线性混合整数规划问题进行滚动求解，并以湖南某台区为例进行分析，验证了所提过载治理策略合理性。

1 动态增容受限台区反向过载治理策略

1.1 反向过载台区动态增容

在某些光伏大量接入的低压配电台区，光伏装机时并未考虑台区消纳能力，超过了台区配变额定容量。在某些夏季典型日，光伏发电在满足台区用电基础上，向电网返送大量功率，导致台区变压器在高负载率，甚至过载状态下运行。为了治理反向过载，保障变压器稳定运行，可以在台区变压器低压侧配置储能，实现台区动态增容，如图 1 所示。

储能在光伏大发时段充电，缓解了反向过载问题，减少了弃光现象。然而由于储能配置成本较高，其容量往往小于过载量。因此本文将从减少台区变压器寿命损耗出发，提出动态增容受限下储能最优

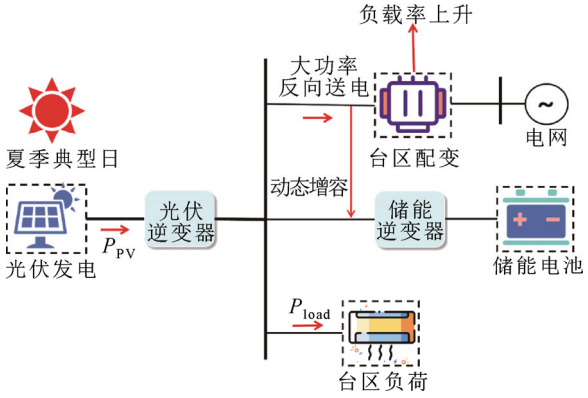


图 1 反向过载台区动态增容

Fig.1 Reverse overload distribution area dynamic capacity expansion

出力策略。

1.2 变压器寿命衰减与负载率的关系

变压器寿命衰减受负载率影响，其内部老化过程如图 2 所示。

如图 2 可见，台区反向功率显著上升达到重载甚至过载运行后，会造成变压器的热点温度，即各绕组间的最高温度上升，造成变压器机械特性劣化和绝缘老化，引起寿命下降。热点温度上升是造成变压器老化主要原因，因此非热改性纸变压器相对热老化率 V 的计算如下[5]：

$$V = 2^{(\theta_h - 98)/6} \tag{1}$$

式中：θ_h 为变压器的热点温度；V 为变压器相对热老化率。

变压器负载上升、下降时变压器热点温度的计算如式(2)、式(3)：

$$\theta_{h,t} = \theta_a + \Delta\theta_{oi} + (\Delta\theta_{or}\left(\frac{1+RK^2}{1+R}\right)^x - \Delta\theta_{oi})f_{1,t} + H_{gi} + \left(H_{gr}K^y - H_{gi}\right)f_{2,t} \tag{2}$$

$$\theta_{h,t} = \theta_a + \Delta\theta_{or}\left(\frac{1+RK^2}{1+R}\right)^x + (\Delta\theta_{oi} - \Delta\theta_{or}\left(\frac{1+RK^2}{1+R}\right)^x)f_{3,t} + H_{gr}K^y \tag{3}$$

式中：θ_a 为环境温度；$\Delta\theta_{oi}$ 为初始状态顶层油温升；H_{gi} 为初始状态热点对顶层油温差；$\Delta\theta_{or}$ 为总损耗下顶层油温升；H_{gr} 为额定电流下热点对顶层油温度差；R 为负载损耗；K 为变压器负载率；x 为顶层油指数；y 为绕组指数。$f_{1,t}$ 为反映顶层油温上升量的时间函数；$f_{2,t}$ 为反映热点对顶层油温度差变化的时间函数；$f_{3,t}$ 为反映顶层油温下降量的时间函数，由附录 A 中公式计算。上述式中的参数取值见附录 B[9]。

通过变压器热点温度可以计算变压器寿命损耗。由 GBT 1094.7—2008[5]，变压器在第 n 个时段的寿命损耗百分数如式(4)所示：

$$D\% = \frac{V_n \cdot t_n \times 100}{S} \tag{4}$$

式中：$D\%$ 为变压器在第 n 个时段的寿命损耗百分数；V_n 为第 n 个时间间隔的相对热老化率；t_n 为第 n 个运行时段的时间间隔；S 为变压器的预期绝缘寿命。

下面考虑变压器寿命衰减，分析动态增容受限下针对反向过载治理的不同储能出力策略。

1.3 考虑变压器寿命衰减的反向过载治理策略

策略 1：储能以最大功率运行

当光伏大量返送电网，负载率超过设定阈值时，储能即以最大功率充电，该策略流程见图 3。

图中 T 处于反向功率严重时段，一般为 10:00—15:00。当前国内很多地区分布式储能试点中采用此出力模式。由于储能容量受限，这种策略下储能往往只在反向功率严重时段前期出力，充满后便不再进行治理。后面过载时刻若持续上网，仍对变压器造成大量寿命损失，过载治理效果较差。

策略 2：储能以恒定功率均匀出力

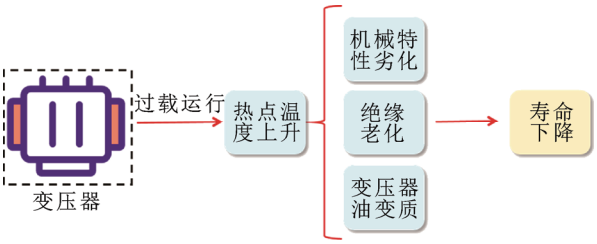


图 2 变压器老化机理

Fig.2 Transformer aging mechanism

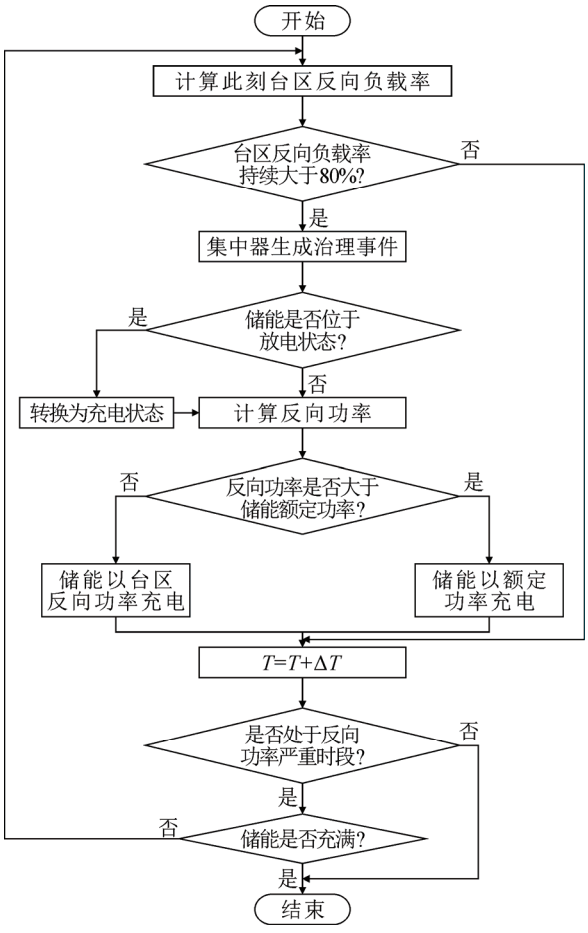


图 3 策略 1 执行流程图

Fig.3 Strategy 1 execution flowchart

为了保证储能在反向功率严重时段一直充电，现令其以恒定功率均匀出力，储能充电功率如下所示：

$$P_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{c}}=\frac{E_{\mathrm{BESS}}}{T_{\mathrm{over}}} \tag{5}$$

式中：$P_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{c}}$ 为储能反向功率严重时段充电功率；E_{BESS} 为储能额定容量；T_{over} 为反向功率严重时间。

设 $K_{o,t_1^{\mathrm{over}}}$、$K_{o,t_2^{\mathrm{over}}}$ 为策略 o 下反向功率严重 t_1^{over}、t_2^{over} 时刻的负载率，o=1,2 分别对应上述策略 1 和策略 2。由储能容量不变，假设过载治理量相同：

$$K_{1,t_1^{\mathrm{over}}}+K_{1,t_2^{\mathrm{over}}}=K_{2,t_1^{\mathrm{over}}}+K_{2,t_2^{\mathrm{over}}} \tag{6}$$

根据两种策略的治理方法不同，得到：

$$K_{1,t_1^{\mathrm{over}}}<K_{2,t_1^{\mathrm{over}}}<K_{2,t_2^{\mathrm{over}}}<K_{1,t_2^{\mathrm{over}}} \tag{7}$$

式中：$K_{1,t_1^{\mathrm{over}}}$ 为在策略 1 作用下储能以额定功率充电时的负载率，维持较低水平；$K_{1,t_2^{\mathrm{over}}}$ 为储能充满后，反向功率较高时刻负载率；$K_{2,t_1^{\mathrm{over}}}$、$K_{2,t_2^{\mathrm{over}}}$ 分别为策略 2 储能均匀出力下 t_1^{over}、t_2^{over} 时刻的负载率。由 1.2 节推导得到变压器寿命损耗与负载率之间满足高次、指数函数关系，得到：

$$(K_{1,t_1^{\mathrm{over}}})+L(K_{1,t_2^{\mathrm{over}}})>L(K_{2,t_1^{\mathrm{over}}})+L(K_{2,t_2^{\mathrm{over}}}) \tag{8}$$

式中：$L(K)$ 表示变压器寿命损耗与负载率之间函数关系。

由式(8)可以看出，策略 2 作用下变压器寿命损耗小于策略 1。这两种策略下储能出力无需进行优化计算，对控制设备要求较低，容易现场实现，可以替代现有的最大功率出力模式。然而储能控制粗放，过载治理效果差。

策略 3：对储能出力优化计算，并将变压器寿命衰减成本引入目标函数

建立考虑变压器寿命衰减的日内滚动调度模型，利用 1.2 节中变压器寿命衰减计算公式，每 15 min 计算一次变压器寿命损耗成本，计算流程图见附录 B。将反向功率严重时段寿命损耗成本叠加，得到变压器寿命损耗总成本并加入目标函数。通过优化求解可以实现储能出力的精细控制，实现反向过载治理效果最优的同时减少台区成本。

2 考虑反向功率严重时段整体特性的日内滚动调度策略

2.1 考虑整体特性的时间窗选取和储能 SOC 初值控制方法

由于储能配置容量有限，为了尽可能消纳光伏，减少反向功率严重时段过载引起的变压器寿命衰减，需要考虑此段时间内的整体特性。若时间窗选取较小，则储能在过载前期可能已经充满，无法得到整体最优的过载治理效果。因此在进行滚动调度时，滚动窗口需要大于反向功率严重时间，即：

$$T_{\mathrm{roll}}\geq T_{\mathrm{over}} \tag{9}$$

式中：T_{roll} 为滚动时间窗。

此外，为了保证储能配置后最优的治理效果，希望其在反向功率严重时段起始的 SOC 接近 0。因此将反向功率严重时段提前，将 10:00 作为一天的调度起始时刻，方便对 SOC 初值进行准确控制，如图 4 所示。

在满足上述原则基础上，本文提出下列几种滚动策略，并对其效果进行逐一分析。

2.2 变窗滚动策略

由于滚动窗口需要大于反向功率严重时段，本文首先提出变时间窗滚动优化方式，如图 5 所示。

滚动时间间隔为 15 min，每次滚动选取当下时刻至一天结束所有时刻为滚动时间窗，利用日内更新后的净负荷数据进行滚动计算，每次仅取第一个时刻调度数据作为实际出力。

2.3 定窗滚动策略

定窗滚动下时间窗 T_{roll} 仍需大于等于 T_{over}，其滚动流程如图 6 所示。

定窗滚动优化下，每次滚动 T_{roll} 时段，取第 1 个 15 min 的计算结果作为实际出力。

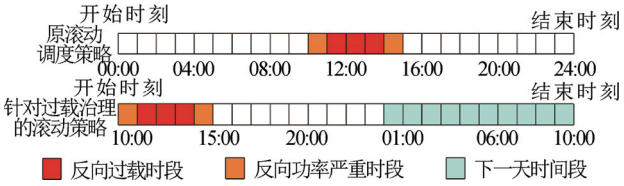


图 4 反向功率严重时段前移

Fig.4 Reverse power shifts forward during severe periods

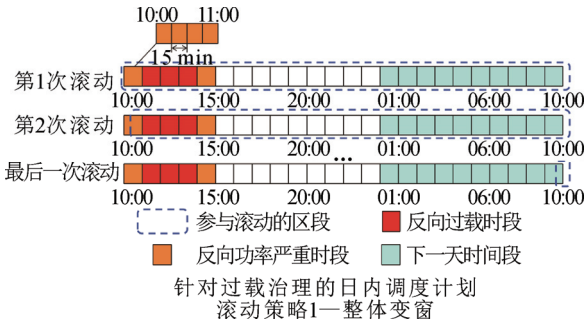


图 5 变窗滚动策略

Fig.5 Variable window rolling strategy

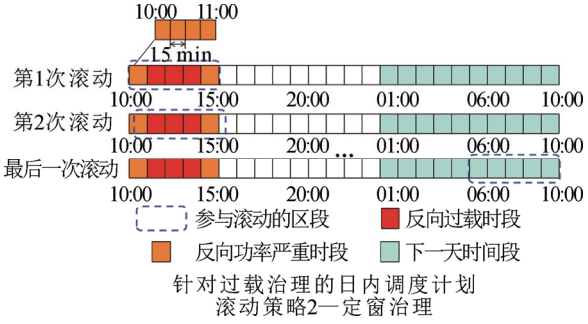


图 6 定窗滚动

Fig.6 Fixed window rolling strategy

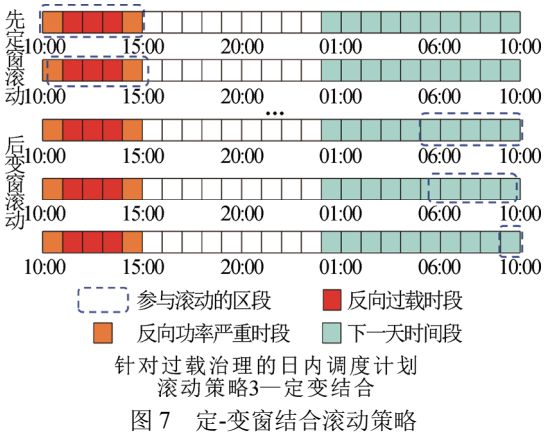


图 7 定-变窗结合滚动策略

Fig.7 Fixed-variable window combined rolling strategy

2.4 定-变窗结合滚动策略

由于 2.2 提出的变窗策略滚动时间窗大，每次滚动时决策变量较多，滚动结果收敛性可能较差，运算速度较慢。而 2.3 提出的定窗策略虽然解决了维数较大的问题，但根据 2.1 中时间窗选取原则，由于反向功率严重时段较长，时间窗选取较大，最后一次调度后直接得到最后 T_{roll} 时段出力，无法考虑后 T_{roll} 内光伏波动特性，因此调度结果存在一定偏差。因此本文进一步提出定变窗结合滚动调度策略，如图 7 所示。

可以看出该策略下首先按照 2.3 定窗策略进行调度，进行完最后一次后调度后，对最后 T_{roll} 段进行变窗滚动，直到得到最后一个时刻调度结果，可以实现对储能出力的精确计算。

3 优化模型建立

通过上述分析，将反向功率严重时段变压器寿命衰减成本引入优化目标；同时考虑弃光成本、储能全周期成本[23]、购售电成本。在控制变压器寿命衰减情况下，尽可能消纳光伏，治理台区反向过载，优化模型如下：

$$\begin{cases}\min \boldsymbol{f} \\ \text{s.t.}\boldsymbol{w}(\boldsymbol{x})=0,\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x})\le 0\end{cases} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{f}$ 是优化目标函数所构成的优化空间；$\boldsymbol{w}(\boldsymbol{x})$ 和 $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x})$ 分别是函数的约束条件，构成了函数求解的可行域。

3.1 目标函数

优化模型的目标函数如式(11)所示：

$$C_{\text{sum}}=C_{\text{Ess}}+C_{\text{Grid}}+C_{\text{PV}}+C_{\text{sh}} \tag{11}$$

式中：C_{sum} 为台区总成本；C_{Ess} 为系统内储能系统的全周期成本；C_{Grid} 为购售电成本；C_{PV} 为系统内的弃光成本；C_{sh} 为变压器寿命损耗成本。

储能系统的全周期成本 C_{Ess} 如下式所示：

$$C_{\text{Ess}}=C_{\text{inv}}+C_{\text{ps}}+C_{\text{om}} \tag{12}$$

式中：C_{inv} 为储能初始投资成本；C_{ps} 为储能运行成本；C_{om} 为储能运维成本。

储能投资成本主要与储能系统的能量与功率有关：

$$C_{\text{inv}}=\alpha\cdot E_{\text{BESS}}+\beta\cdot P_{\text{BESS}} \tag{13}$$

式中：E_{BESS} 和 P_{BESS} 分别表示储能系统容量和功率；α 和 β 分别表示储能系统的单位容量成本和单位功率成本。

储能系统运行成本如式(14)所示：

$$C_{\text{ps}}=\sum_{t=1}^{N}c_{\text{ope}}(P_{\text{ES},t}^{\text{d}}+P_{\text{ES},t}^{\text{c}})\Delta t \tag{14}$$

式中：c_{ope} 为储能系统单位功率的出力成本；$P_{\text{ES},t}^{\text{d}}$ 和 $P_{\text{ES},t}^{\text{c}}$ 分别为储能系统的放电与充电功率；N 代表一次滚动调度的时段数；Δt 为调度时段内的时间间隔。

储能系统运维成本如式(15)所示：

$$C_{\text{om}}=C_{\text{inv}}\times 5\% \tag{15}$$

台区购售电成本如式(16)所示：

$$\begin{cases}C_{\text{Grid+}}=\sum_{t=1}^{N}c_{\text{buy},t}\cdot P_{\text{GRID},t},P_{\text{GRID},t}>0 \\ C_{\text{Grid-}}=\sum_{t=1}^{N}c_{\text{sell},t}\cdot P_{\text{GRID},t},P_{\text{GRID},t}<0 \\ C_{\text{Grid}}=C_{\text{Grid+}}+C_{\text{Grid-}}\end{cases} \tag{16}$$

式中：$c_{\text{buy},t}$ 和 $c_{\text{sell},t}$ 分别为向电网购电与售电的价格；$P_{\text{GRID},t}$ 表示电网在 t 时刻与微网系统进行交换的功率，为正表示系统从电网购电，为负表示系统向电网售电。

为了尽可能减少弃光，引入弃光成本如下式所示：

$$C_{\mathrm{PV}}=\sum_{t=1}^{N}c_{\mathrm{PV}}P'_{\mathrm{PV},t}\Delta t \tag{17}$$

式中：c_{PV}为单位功率弃光成本；$P'_{\mathrm{PV},t}$为在t时刻的弃光功率。

计算一个调度区间内反向功率严重时段变压器寿命损耗成本如式(18)所示：

$$C_{\mathrm{sh}}=\sum_{t=t_{\mathrm{in}}^{\mathrm{over}}}^{T_{\mathrm{over}}}C_{\mathrm{tz}}D\% \tag{18}$$

式中：C_{sh}为变压器损耗成本；C_{tz}为变压器投资成本，$t_{\mathrm{in}}^{\mathrm{over}}$为反向功率严重时段初始时刻。

3.2 约束条件

台区功率平衡约束为：

$$P_{\mathrm{load},t}=P_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{d}}+P_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{c}}+P_{\mathrm{GRID},t}+P_{\mathrm{PV},t} \tag{19}$$

式中：$P_{\mathrm{load},t}$为t时刻系统中的负荷功率；$P_{\mathrm{PV},t}$为在t时刻的光伏功率。

由于台区现场净负荷数据较容易获取，定义台区内净负荷$P_{\mathrm{LOAD},t}$为实际负荷数据减去光伏发电数据，净负荷为负证明存在光伏反向送电情况：

$$P_{\mathrm{LOAD},t}=P_{\mathrm{load},t}-P_{\mathrm{PV},t} \tag{20}$$

电网功率约束如式(21)所示：

$$P_{\mathrm{GRID,min}}<\left|P_{\mathrm{GRID},t}\right|<P_{\mathrm{GRID,max}} \tag{21}$$

式中：$P_{\mathrm{GRID,max}}$和$P_{\mathrm{GRID,min}}$分别为电网侧交换功率的最大与最小值。

储能放电与充电不能同时进行，故需要满足：

$$u_t^{\mathrm{d}}+u_t^{\mathrm{c}}\le 1 \tag{22}$$

式中：u_t^{d}和u_t^{c}分别表示储能放电与充电状态，为0-1变量。

储能其他约束为：

$$\begin{cases}0\le u_t^{\mathrm{c}}P_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{c}}\le P_{\max}^{\mathrm{c}}\\ -P_{\max}^{\mathrm{d}}\le u_t^{\mathrm{d}}P_{\mathrm{ES},t}^{\mathrm{d}}\le 0\\ S_{\mathrm{OC},t+1}=S_{\mathrm{OC},t}+\dfrac{P^{\mathrm{c}}{}_{\mathrm{ES},t}\eta_{\mathrm{ch}}}{E_{\mathrm{BESS}}}\\ S_{\mathrm{OC},t+1}=S_{\mathrm{OC},t}-\dfrac{P^{\mathrm{d}}{}_{\mathrm{ES},t}}{\eta_{\mathrm{dis}}E_{\mathrm{BESS}}}\\ S_{\mathrm{OC,min}}\le S_{\mathrm{OC},t}\le S_{\mathrm{OC,max}}\end{cases} \tag{23}$$

式中：$P_{\max}^{\mathrm{c}}$和$P_{\max}^{\mathrm{d}}$为在一个时间段内储能电池最大充电与放电功率；$S_{\mathrm{OC},t}$表示t时刻储能电池的荷电状态；η_{ch}和η_{dis}分别代表储能电池的充放电效率。

在反向功率严重时段，储能要处于充电状态，因此充电约束为：

$$\begin{cases}\alpha_{\mathrm{ch}}^{\mathrm{over}}=\left(\alpha_{\mathrm{ch},1}^{\mathrm{over}},\alpha_{\mathrm{ch},2}^{\mathrm{over}},\alpha_{\mathrm{ch},3}^{\mathrm{over}},\cdots,\alpha_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{over}}\right)\\ T_{\mathrm{over}}=\Sigma\alpha_{\mathrm{ch},t}^{\mathrm{over}}\Delta t\end{cases} \tag{24}$$

式中：$\alpha_{\mathrm{ch}}^{\mathrm{over}}$为储能在反向功率严重时段的开关变量。

此外为保证调度的连续性，需确保调度起始时刻储能系统的荷电状态与结束相同。

4 算法设计

4.1 问题分析

第3章所建立的考虑变压器寿命损耗的反向过载治理模型属于非线性混合整数规划问题(MINP问题)，如果使用优化求解器对此问题进行求解需要进行线性化。由于线性化过程会造成模型失真等问题，因此本文将采用启发式算法对模型进行求解分析。

粒子群优化算法可以求解复杂的优化问题，但传统的粒子群算法在求解过程中容易陷入局部最优解，且在面对大规模高维问题时需要大量计算时间才能找到最优结果。因此针对本文模型维度较高、计算复杂等特点，提出基于混沌映射与精英反向学习策略的改进粒子群算法。

4.2 混沌序列初始化

目前关于启发式算法的研究表明，多样化较好的初始种群能显著提示粒子群算法的搜索效率。但目前粒子群算法的种群初始化主要仍采用随机生成的方式，这导致生成的粒子种群在搜索空间内的多样性较差。此外，由于在初始种群时没有对全局最优解的先验知识，应该使初始化种群尽可能地均匀分布在搜索空间。

混沌作为一种非线性现象具有很强的随机性、遍历性和规律性，如果采用混沌作为产生初始种群的方式能很好地提高初始种群的多样性。本文采用Logistic 映射模型产生混沌序列进行种群初始化，其数学表达式如式(25)所示：

$$y_h^{z+1}=4y_h^z(1-y_h^z) \tag{25}$$

式中：y_h^z为混沌变量，其取值在[0,1]之间，$h=1,2,\cdots,H$为混沌变量的序号，$z=1,2,\cdots,Z$为种群的序号。

先设置存在微小差异的H个混沌变量的初始值，然后依次取$z=1,2,\cdots,Z$即可得到Z个初始种群的混沌变量个体。在生成混沌种群后，采用下式将混沌变量映射至优化变量的空间中：

$$s_h^z=l_h+\left(u_h-l_h\right)y_h^z \tag{26}$$

式中：s_h^z为映射后的变量，$[l_h,u_h]$为优化变量所构

成的搜索空间。

通过 Logistic 混沌映射产生的初始种群能有效提升粒子群算法的初始搜索效率，能很好地解决本文复杂的高维问题。

4.3 精英反向学习策略

在更新粒子种群中的 pbest 与 gbest 时，通常只考虑了种群内个体的整体优劣，但对单一个体的不同维度优劣没有进行考量。针对粒子群算法存在的这个问题，本文采用 Tizhoosh 提出的反向学习策略[24]，并结合精英学习思想，对粒子群算法进行了改进，具体改进策略如下。

设定 $x_{i,g}$ 和 $x_{i,g}^{*}$ 为粒子种群第 i 个个体第 g 次迭代的当前解与反向解，$x_{i,j,g}$ 和 $x_{i,j,g}^{*}$ 为其在第 j 维的当前解与反向解。选定整个粒子种群中的 k 个精英个体为 $\{p_{1,g},p_{2,g},\cdots,p_{k,g}\}\subseteq\{x_{1,g},x_{2,g},\cdots,x_{M,g}\}$，则第 i 个个体第 j 维的反向解 $x_{i,j}^{*}(t)$ 定义如式(27)所示：

$$x_{i,j,g}^{*}=\gamma\left(a_{j,g}+b_{j,g}\right)-x_{i,j,g} \tag{27}$$

式中：γ 为 0 到 1 之间的随机数，$a_{j,g}=\min\{p_{1,j,g},p_{2,j,g},\cdots,p_{k,j,g}\}$，$b_{j,g}=\max\{p_{1,j,g},p_{2,j,g},\cdots,p_{k,j,g}\}$。如果 $x_{i,j,g}^{*}$ 超出了 $a_{j,g}$ 和 $b_{j,g}$ 的范围内，需要将其限制在这二者之间。

本文选定种群个数的 10%为精英个体，根据式(27)可知，精英反向学习可以结合当前解与反向解的优秀维度，从而选择优秀个体，降低算法陷入局部最优的概率。同时本策略可以提取整个种群中精英个体的特征，能提高算法的收敛速度，对于求解高维优化问题有着显著的帮助。

改进后的粒子群算法执行流程如图 8 所示：本文利用 MATLAB 进行求解，CPU 型号为 AMD Ryzen 5 4600H。

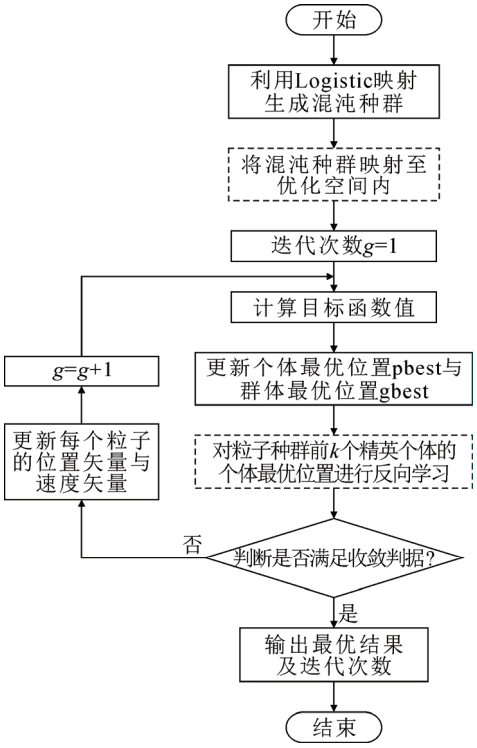


图 8 改进后粒子群算法

Fig.8 Improved particle swarm algorithm

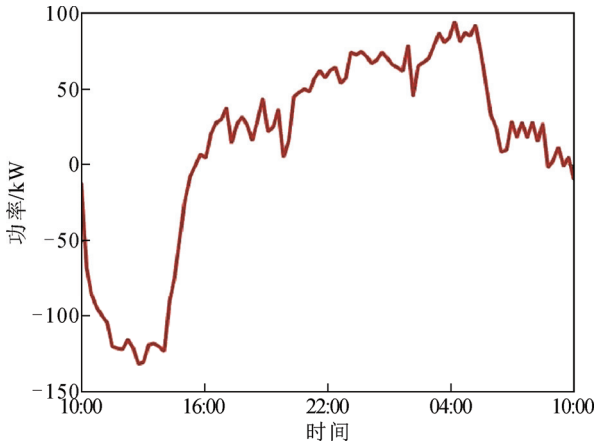


图 9 某渔业养殖台区净负荷曲线

Fig.9 Load curve of a certain aquaculture distribution area

5 案例分析

选取某实际反向过载渔光养殖配电台区作为案例进行分析。该台区配变容量 100 kVA，变压器投资成本为 30 000 元。光伏容量为 143 kW，由于成本受限，储能现场配置 50 kW/100 kWh，容量小于夏季典型日光伏反向过载量。反向功率严重时间取为每日 10:00—15:00，共 5 h。夏季某典型日台区的净负荷曲线如图 9 所示。

根据第 2 章分析，为了满足滚动调度储能 SOC 初值控制需求，初始时刻设为 10:00，反向功率严重时段负载率如图 10 所示。

分别针对第 1 章中所提出的过载治理策略以及第 2 章不同的滚动调度策略，设置 5 种场景进行对比分析。

场景 1，严重反向功率开始时储能即以最大功率出力。

场景 2，储能在反向功率严重时段均匀出力。

场景 3，将寿命损失成本加入目标函数，进行变窗滚动调度。

场景 4，将寿命损失成本加入目标函数，进行定窗滚动调度。

场景 5，将寿命损失成本加入目标函数，进行定-变窗结合滚动调度。

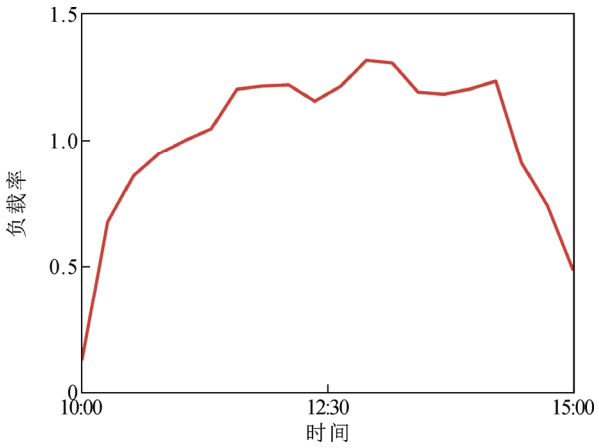


图 10 某渔业养殖台区反向功率严重时段的负载率曲线

Fig.10 Load factor of reverse load period in a certain aquaculture distribution area

首先针对两种不经优化计算的场景 1、场景 2 进行分析。场景 1 中反向功率严重时段储能调度结果如图 11 所示。

在场景 1 的工况下，反向负载率超过 80%时储能即以额定功率充电，充满后不再工作。利用第 1 节中的变压器寿命损耗计算模型，得到考虑变压器损耗的台区总成本为 4 081.1 元。

场景 2 中反向功率严重时段储能调度结果如图 12 所示。

在场景 2 的工况下，储能在功率反向时段均匀充电。用前文所提到的计算模型，得到包含变压器寿命损耗的台区总成本为 2 935.7 元，优于场景 1。

下面对储能出力进行优化计算，粒子群种群数设置为 250，最大迭代次数为 250 次，个体与群体学习因子均为 2。日内滚动时间间隔为 15 min，本文采用叠加随机误差的方法模拟在日内滚动时净负荷预测数据的更新。

场景 3 变窗滚动下计算结果如图 13 所示。

在场景 3 的工况下，计算得到的包含变压器寿命损耗的台区总成本为 2 687.6 元，远远低于没有经过优化计算的场景 1、2。

场景 4 的定窗滚动调度结果如图 14 所示。

在场景 4 的定窗滚动调度工况下，计算得到的包含变压器寿命折算的台区系统运行成本为 2 579.6 元，优于变窗场景。对定窗、变窗策略下算法的收敛性进行比较，如图 15 所示。

可以看出定窗策略单次滚动在迭代 50 次后逐渐收敛，而变窗策略在 200 次后才收敛。此外，相同硬件条件下，定窗单次滚动计算需要的时间为 42 s，

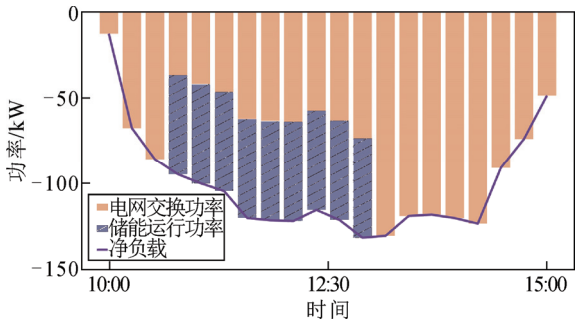


图 11 储能以最大功率充电

Fig.11 Energy storage charging at rated power

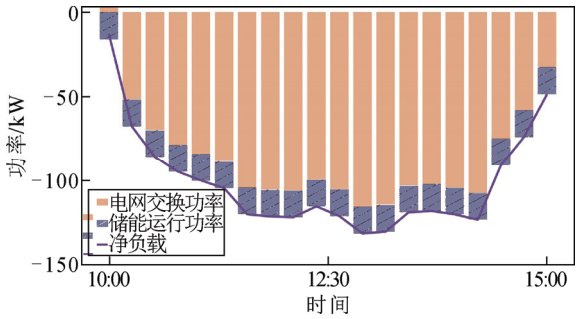


图 12 储能以恒定功率充电

Fig.12 Energy storage charging at constant power

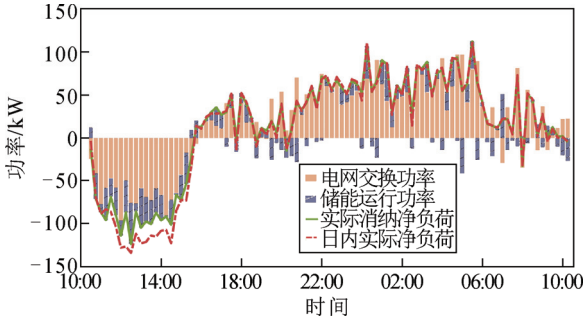


图 13 变窗滚动调度结果

Fig.13 Variable window rolling scheduling results

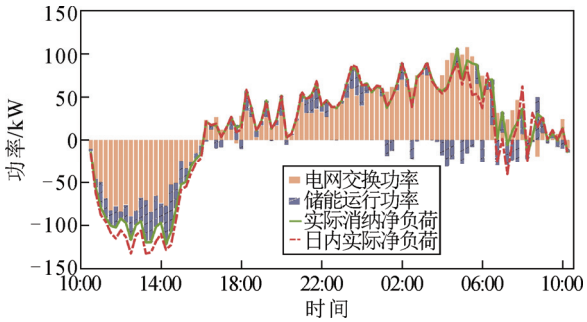


图 14 定窗滚动调度结果

Fig.14 Fixed window rolling scheduling results

而变窗策略单次滚动所需要的时间为 122 s。由于定窗滚动下每次滚动优化变量维数低于变窗滚动情

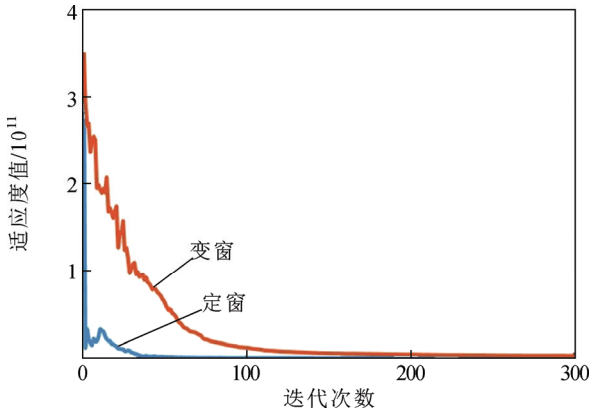


图 15 定变窗策略单次滚动收敛性比较

Fig.15 Comparison of single-roll convergence of fixed-variable window strategies

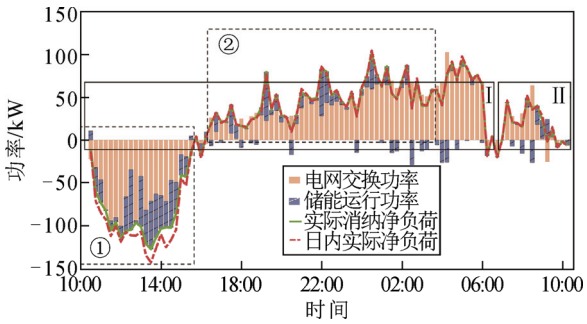


图 16 定变窗结合滚动调度结果

Fig.16 Fixed-variable window combined rolling scheduling results

表 1 5 种场景下各类成本

Table 1 Costs under five scenarios

场景	储能全周期成本/元	购售电成本/元	弃光成本/元	变压器寿命损耗成本/元	总成本/元
1	733.4	1 687.4	366.5	1 293.8	4 081.1
2	805.3	1 653.6	347.2	129.7	2 935.7
3	1 074.9	1 350.8	226.9	35.0	2 687.6
4	1 050.6	1 344.5	152.8	31.7	2 579.6
5	999.9	1 093.1	140.1	53.9	2 288.0

况，定窗滚动在收敛性与计算速度上明显优于变窗滚动，因此得到更优计算结果。然而，由于考虑反向功率严重时段整体特性导致时间窗选取较大，最后一次定窗滚动后直接得到最后 5 h 的调度结果，无法跟踪光伏、负荷日内变化，因此净负荷调度值与实际净负荷存在较大差异，如图 14 标注所示。为了解决此问题，本文提出定变窗结合的滚动调度策略，优化结果如图 16 所示。

图 16 中阶段 I 为定窗滚动，阶段 II 为变窗滚动。计算得到包含变压器寿命成本的台区系统总成本为 2 288 元，优于前述 4 种场景。可以看出此场景下，后面时段日内消纳净负荷的调度结果可以实时跟踪日内实际净负荷的变化，解决了时间窗过大带来的问题。在图 16 中，储能在优化后的工作状态可分别划分为 2 个阶段：阶段①为台区的反向功率严重时段，储能电池此时充电，降低台区变压器的负载率，减少变压器寿命损失；阶段②储能放电，供给用电负荷，减小购电成本，同时清空自身容量，为下一个典型日的过载治理做准备。5 种场景下各类成本的对比如表 1 所示。

可以看出过载优化治理策略下，变压器损耗成本和总成本显著降低。其中定变窗结合滚动时变压器负载率维持较低水平，同时尽可能消纳光伏，调度结果最优。

本文所提反向过载优化治理策略，在台区任何源荷储配置情况下均适用，不论台区反向过载问题是否严重，均可得到一个考虑变压器寿命的台区最优的过载治理策略。由于实际配电台区光伏渗透率高，且储能配置成本高，导致储能配置容量往往小于光伏反向过载量。此外，台区负荷特性可能变化，在本文案例台区用电负荷较小典型日，经过定变窗结合滚动调度后台区运行情况如图 17 所示。

储能在阶段①的运行策略与前述相同；但在阶段②中，由于负荷较小，储能放电供给负荷后，余电反向上网，获得部分上网收益，此时台区用电成本为 395.73 元。

6 结论

针对光伏配电台区反向过载问题，本文基于变压器寿命损耗与负载率关系，提出过载优化治理策略。并考虑反向功率严重时段整体特性，制定滚动调度策略，得到如下结论：

1）对比分析动态增容受限下针对反向过载治理的储能最大功率运行策略、恒定功率运行策略，以及优化治理策略，得到优化策略下得到的过载治理效果明显提高。

2）考虑反向功率严重时段整体特性进行变窗滚动时，每次滚动变量维数高，运算时间长，计算收敛性和优化效果较差。定窗滚动时由于时间窗较大，最后一次调度后消纳负荷调度结果无法实时跟踪净负荷变化。由此提出定变窗结合滚动调度策略，解决上述存在的问题。

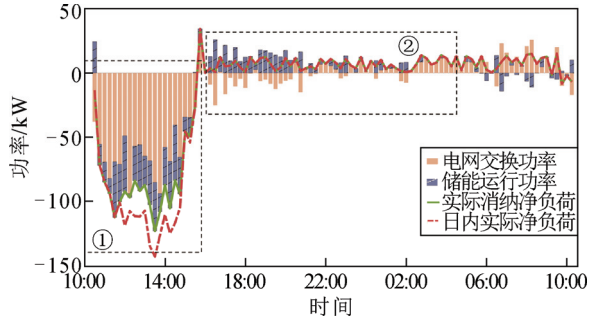


图 17 用电负荷较小典型日滚动调度结果

Fig.17 Results of rolling scheduling on typical days with low power load

3）基于混沌映射与精英反向学习策略的改进粒子群算法能够有效求解本文过载治理的非线性混合整数规划(MINP)模型。对实际反向过载台区进行求解，验证了本文过载治理和滚动调度策略正确性。本文所提反向过载优化治理策略，在台区任何源荷储出力情况下均适用，都能得到过载治理效果最优的储能调度结果。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 陈 娟，高江梅. 基于演化博弈的户用光伏整县开发协同机制及仿真[J]. 电网技术，2023，47(2)：669-678.
CHEN Juan, GAO Jiangmei. Coordination mechanism and simulation of household photovoltaic county development based on evolutionary game[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 669-678.

[2] 李军徽，孙大朋，朱星旭，等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(10)：47-56.
LI Junhui, SUN Dapeng, ZHU Xingxu, et al. Voltage regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 47-56.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则：GB/T 1094.7—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers-part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: GB/T 1094.7—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.

[4] ZHANG T, YANG J H, JIN K Y, et al. Local power consumption method of distributed photovoltaic generation in rural distribution network based on blockchain[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(6): 1409-1418.

[5] 葛津铭，刘英儒，庞 丹，等. 含高渗透率光伏配电网的集群划分电压控制策略[J]. 高电压技术，2024，50(1)：74-82.
GE Jinming, LIU Yingru, PANG Dan, et al. Cluster division voltage control strategy of photovoltaic distribution network with high permeability[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 74-82.

[6] 董旭柱，张 琛，阮江军，等. 油浸式电力变压器动态载荷评估技术研究与应用[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1959-1968.
DONG Xuzhu, ZHANG Chen, RUAN Jiangjun, et al. Research and practices of dynamic thermal rating for oil-immersed power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1959-1968.

[7] MUHAMAD N A, KAMARDEN H, OTHMAN N A. Heat distribution pattern of oil-filled transformer at different hottest spot temperature locations[C]//11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Sydney, Australia: IEEE, 2015: 979-982.

[8] MALEEWAT P, TADSUAN S, SAELEE V, et al. Oil-immersed transformer temperature monitoring by ANSI/IEEE C57.91 model[C]//International Power Engineering Conference. Singapore, Singapore: IEEE, 2007: 1092-1096.

[9] 刘 睿，张宗喜，蒋 伟，等. 油浸式配电变压器过载能力研究[J]. 科学技术与工程，2016，16(36)：166-172.
LIU Rui, ZHANG Zongxi, JIANG Wei, et al. Optimization for overload capacity of oil-immersed distribution transformer[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(36): 166-172.

[10] 夏 梦，王 慧，庄汝学，等. 基于故障概率指标的电力变压器故障诊断及决策分析[J]. 电器与能效管理技术，2022(11)：59-62，80.
XIA Meng, WANG Hui, ZHUANG Ruxue, et al. Power transformer fault diagnosis and decision analysis based on fault probability index[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(11): 59-62, 80.

[11] 李建林，姜冶蓉，马速良，等. 新型电力系统下分布式储能应用场景与优化配置[J]. 高电压技术，2024，50(1)：30-41.
LI Jianlin, JIANG Yerong, MA Suliang, et al. Application scenarios and optimal configuration of distributed energy storage under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 30-41.

[12] 李更丰，孙少华，别朝红，等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.

[13] 赵小磊，姚良忠，刘运鑫，等. 面向储能多应用价值协同的风光储系统日前优化调度方法[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2511-2522.
ZHAO Xiaolei, YAO Liangzhong, LIU Yunxin, et al. Day-ahead optimal dispatch for wind-photovoltaic-storage system considering synergistic multi-application value of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2511-2522.

[14] 张淑婷，陆 海，林小杰，等. 考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：93-101.
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-101.

[15] CHENG S, WANG R, XU J Y, et al. Multi-time scale coordinated optimization of an energy hub in the integrated energy system with multi-type energy storage systems[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 47(22): 101327.

[16] MA H L, DU W, WANG Q, et al. Research on wind-hydro-thermal power system multi-time scale coordinated optimal dispatch[C]// 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Chengdu, China: IEEE, 2019: 2815-2819.

[17] 任佳依，顾 伟，王 勇，等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报，2018，38(5)：1397-1407.

REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.

[18] 吴永飞，包宇庆. 电能型-功率型混合储能日前-日内协同滚动调度策略[J]. 电力系统自动化，2024，48(1)：77-87.
WU Yongfei, BAO Yuqing. Coordinated day-ahead and intra-day rolling scheduling strategy for electricity-power hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 77-87.

[19] WANG Z J, ZHAN Z H, KWONG S, et al. Adaptive granularity learning distributed particle swarm optimization for large-scale optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(3): 1175-1188.

[20] CHENG R, JIN Y C. A competitive swarm optimizer for large scale optimization[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2015, 45(2): 191-204.

[21] YANG Q, CHEN W N, DA DENG J, et al. A level-based learning swarm optimizer for large-scale optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 22(4): 578-594.

[22] 汪慎文，丁立新，谢承旺，等. 应用精英反向学习策略的混合差分演化算法[J]. 武汉大学学报(理学版)，2013，59(2)：111-116.
WANG Shenwen, DING Lixin, XIE Chengwang, et al. A hybrid differential evolution with elite opposition-based learning[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2013, 59(2): 111-116.

[23] 张雯雯，魏震波，郭 毅，等. 含混合储能的交直流配电网日经济优化运行[J]. 高电压技术，2022，48(2)：565-574.
ZHANG Wenwen, WEI Zhenbo, GUO Yi, et al. Optimal daily economic operation of AC/DC distribution network with hybrid energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 565-574.

[24] TIZHOOSH H R. Opposition-based learning: a new scheme for machine intelligence[C]//International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce. Vienna, Austria: IEEE, 2005: 695-701.



张轶炫
1999—，男，硕士生
主要从事电力系统优化运行、电力系统接地计算方面的研究工作
E-mail: zyix1312@163.com
ZHANG Yixuan



田志曈
2002—，男，硕士生
主要从事电力系统优化运行方面的研究工作
E-mail: 2020302191011@whu.edu.cn
TIAN Zhitong



鲁海亮(通信作者)
1982—，男，博士，副教授，博导
主要从事电力系统接地技术、电力系统优化运行方面的研究工作
E-mail: luhailiang@whu.edu.cn
LU Hailiang
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2024-04-30 修回日期 2024-06-12 编辑 陈 蔓

附录 A

$f_{1,t}$ 为反映顶层油温上升量的时间函数；$f_{2,t}$ 为反映热点对顶层油温度差变化的时间函数；$f_{3,t}$ 为反映顶层油温下降量的时间函数，计算公式为：

$$f_{1,t}=1-\mathrm{e}^{-t/(k_{11}\tau_0)} \tag{A1}$$

$$f_{2,t}=k_{21}\left(1-\mathrm{e}^{-t/(k_{22}\tau_{\mathrm{w}})}\right)-\left(k_{21}-1\right)\left(1-\mathrm{e}^{-t/(\tau_0/k_{22})}\right) \tag{A2}$$

$$f_{3,t}=\mathrm{e}^{-t/(k_{11}\tau_0)} \tag{A3}$$

代入附表 B1 所有参数取值，得到计算变压器热点温度的公式：

$$\theta_{\mathrm{h},t+1}=25+\Delta\theta_{\mathrm{oi},t}+(13.117\times\left(1+5K_{t+1}^2\right)^{0.8}-\Delta\theta_{\mathrm{oi},t})\times(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{180}})+H_{\mathrm{gi}}+\left(23\times K_{t+1}^{1.6}-H_{\mathrm{gi}}\right)(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{8}}) \tag{A4}$$

$$\theta_{\mathrm{h}}\left(t+1\right)=25+55\times\left(1+5K_{t+1}^2/6\right)^{0.8}+(\Delta\theta_{\mathrm{oi},t}-55\times\left(1+5K_{t+1}^2/6\right)^{0.8})\times(1-\mathrm{e}^{-\frac{t}{180}})+23\times K_{t+1}^{1.6} \tag{A5}$$

附录 B

表 B1　变压器寿命损耗计算参数取值

Table B1　Values of calculation parameters for transformer life loss

参数	取值
环境温度 θ_{a} /℃	25
油指数 x	0.8
绕组指数 y	1.6
油时间常数 τ_0	180
绕组时间常数 τ_{W}	4
常数 k_{11}	1.0
常数 k_{21}	1.0
常数 k_{22}	2.0
损耗比 R	5
热点系数 H	1.1
总损耗下顶层油温升 $\Delta\theta_{\mathrm{or}}$ /℃	55
额定电流下热点对顶层油温度梯度 H_{gr}	23

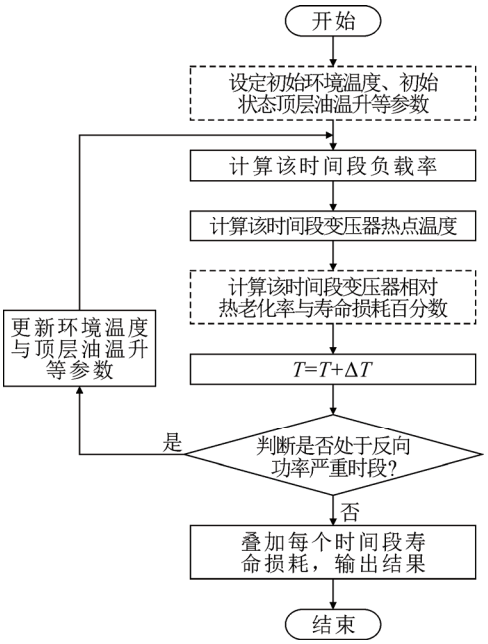


图 B1　变压器寿命衰减计算框图

Fig.B1　Transformer life decay calculation framework