

计及调相模式的压缩空气储能系统选址定容方法

张险峰¹, 陈来军², 史云乾³, 高源³, 李明明³, 王鸿³

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

3. 中国三峡新能源(集团)股份有限公司, 北京 100053)

摘要:随着我国政策的调整,独立储能电站被允许参与电力市场和辅助服务市场。然而,在新型电力系统中,各节点的电压越限风险不同,AA-CAES在不同节点能够发挥的电压支撑能力不同,AA-CAES能够获得的利润不同,本文提出了一种计及调相模式的压缩空气储能系统选址定容方法以最大化电站利润。本文首先建立了计及调相模式的AA-CAES模型;其次,提出AA-CAES在配电网中的选址与容量配置模型;接着,基于DistFlow模型将上述选址与容量配置模型转化为一个混合整数的二阶锥规划问题并通过求解器求解;最后通过AA-CAES在改良IEEE 33配电网系统中的选址与容量配置进行算例分析。算例表明,计及调相模式后,在典型日内,AA-CAES的收益可以提高1.86%,电网中最低电压幅值上升了0.012 2 p.u.。本文所提计及调相模式的AA-CAES选址与容量配置方法不仅能够有效提高独立储能电站的经济效益,还可以有效提高电网中的电压电能质量。
关键词:先进绝热压缩空气储能;调相运行;辅助服务市场;选址定容;混合整数二阶锥优化

Site Selection and Capacity Determination Method for Compressed Air Energy Storage Systems Considering Condenser Operation Mode

ZHANG Xianfeng¹, CHEN Laijun², SHI Yunqian³, GAO Yuan³, LI Mingming³, WANG Hong³

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Three Gorges New Energy Co., Ltd.,

Beijing 100053, China)

Abstract: With the policy adjustment in China, independent energy storage power stations are now permitted to participate in electricity markets and ancillary service markets. However, in the new power system, the risk of voltage violation varies across different nodes, leading to differences in the voltage support capability and potential profits achievable by an Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) system depending on its location. In this paper a site selection and capacity determination method for compressed air energy storage systems considering var support operation mode is proposed to maximize the profit of power station. Firstly, the AA-CAES model considering the var support operation mode is set up. Then, the site selection and capacity configuration of AA-CAES in power distribution is proposed. After that, based on the DistFlow model, the above-mentioned site selection and capacity configuration model is transformed into a mixed-integer second-order cone programming (MISOCP) problem and solved by using a commercial solver. Finally, case analysis is conducted in the site selection and capacity determination on a modified IEEE 33-bus distribution system by AA-CAES. The example calculation shows that after considering the var support mode, the daily revenue of AA-CAES is increased by 1.86%, and the minimum voltage amplitude in the grid is improved by 0.0122 p.u. The proposed method for siting and sizing AA-CAES with consideration of var support not only effectively enhances the economic benefits of independent energy storage stations, but also improves voltage and power quality in the distribution network.

收稿日期:2025-09-24; 修回日期:2025-10-10

基金项目:中国三峡新能源(集团)股份有限公司科研项目(15044105)。

Project Supported by China Three Gorges Renewables(Group)Co., Ltd. (15044105)。

Keywords: advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES); var support operation; ancillary service market; siting and sizing; mixed integer second order conic programming

0 引言

在双碳目标快速推进的过程中,高比例新能源、高比例电力电子设备接入的新型电力系统展现出了一系列新的问题与挑战^[1],如系统调频能力下降、电压支撑能力下降,部分地区出现频率失稳、电压越限的风险。储能不仅能够平抑新能源的波动性,还可以提供调峰、调频、调相等辅助服务,能够在一定程度上解决以上问题,是未来新型电力系统中不可或缺的重要组成部分^[2-6]。

在电力系统物理结构发生巨大改变的同时,我国的电力体制也在进行着巨大变革。一方面,电力市场现货市场已经在多地投入运行,并取得了一定成效^[7];另一方面,辅助服务市场改革进行得如火如荼,目前,新型储能已经被允许作为独立主体参与辅助服务市场^[8]。这意味着独立电站可以通过参与电力市场与辅助服务市场获利,实现自身的商业化运行。

先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES)凭借其生命周期长、单位容量成本低、安全稳定等优点在诸多储能技术路线中脱颖而出^[9],成为继抽水蓄能后另一大规模储能技术。AA-CAES通过同步发电机并网,这意味着AA-CAES不仅具有传统储能调峰等功能,还可以提供冷热电联供^[10]、调频^[11]、无功调相^[12]等辅助服务。同时,随着人工硐室^[13]、管线钢^[14]等新型储气库的发展与应用,AA-CAES的选址受限性被进一步释放,甚至可以在配电网中作为能量

枢纽,提供电压支撑,提高配电网的运行可靠性^[15]。

AA-CAES的容量配置与选址优化是一个复杂的博弈问题,现有研究大多将配置对象的建设成本利用折现率折算为每个典型日的成本,并通过优化调度模型对其进行优化运行模拟,最终得到最优的配置结果^[16-17]。AA-CAES因为其复杂的运行特性和多模式运行的潜力,其容量配置与选址优化问题更为复杂,现有研究针对其惯量、备用、爬坡等辅助服务发展出了一些方法^[18]。然而,目前大多AA-CAES的配置研究对其调相模式考虑不足,缺乏AA-CAES对电力系统的电压支撑能力分析。

针对这一问题,本文提出了一种计及调相模式的AA-CAES选址定容方法。首先建立了综合考虑AA-CAES调相模式的模型,然后建立了计及调相模式的先进绝热压缩空气储能选址定容模型,接着通过松弛方法将模型松弛为混合整数二阶锥优化问题(mixed integer second order conic programming, MISOCP),最后通过算例证明了本文提出方法的有效性。

1 AA-CAES调相运行特性

1.1 AA-CAES系统工作原理

AA-CAES系统一般由压缩机、换热器、储气库、高低温储热罐、膨胀机等构成,两级压缩、两级膨胀的典型系统拓扑结构如图1所示。在充电时,AA-CAES系统利用电网的低谷电能驱动电动机,通过压缩机将空气压缩为高温高压的空气,并通过

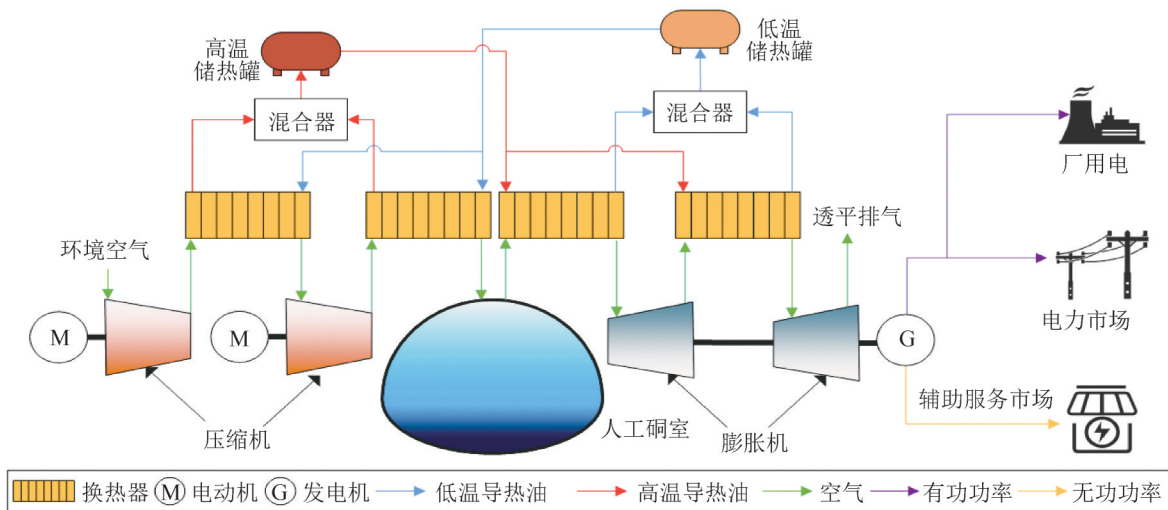


图1 AA-CAES系统结构示意图
Fig. 1 Structural schemaic diagram of AA-CAES system

换热器降温为常温高压空气储入储气库中,同时换热器利用空气的内能将导热油加热为高温导热油,储入高温储热罐中;在放电时,AA-CAES 系统将储气库中的高压空气释放出来,经过换热器加热为高温高压空气,并驱动膨胀机转动进行发电,同时级间换热器利用膨胀后的乏气将高温导热油降温为低温导热油并储入低温储热罐。

AA-CAES 对电网的无功支撑可以体现在其发电工况、压缩工况以及闲置工况下。在发电工况下,通过控制发电机的励磁可以灵活调节其注入电网的无功功率^[19]。在压缩工况下与闲置工况下,可以打开储气库通往膨胀机组的阀门,利用小流量的高压空气驱动膨胀机组低功率运行,所发电量的少量有功分量可以作为厂用电等,无功分量可以并网,为电网提供电压支撑辅助服务。为与传统的压缩工况和闲置工况做出区分,分别称这两种运行模式为压缩-调相模式和同步调相模式,统称为调相模式^[20]。

1.2 AA-CAES 调相模式运行约束

因为 AA-CAES 的释能侧本质上是一个膨胀机驱动同步发电机,所以其调相模式的运行特性与传统同步发电机类似,及受到电枢电流极限和励磁电流极限的约束。

1.2.1 电枢电流极限

为了防止定子绕组过热,需对发电机的电枢电流作出限制,即发电机的出力受到额定容量的限制,公式为

$$P^2 + Q^2 \leq S^2 \quad (1)$$

式中, P , Q , S 分别为发电机输出的有功功率、无功功率和额定视在功率。

1.2.2 励磁电流极限

为了防止转子绕组过热,需对发电机的磁场电流做出限制。根据发电机的功率方程,其边界为

$$P_{\text{edge}} = \frac{E_q E_t}{X_d} \sin \delta_i \quad (2)$$

$$Q_{\text{edge}} = \frac{E_q E_t}{X_d} \cos \delta_i - \frac{E_t^2}{X_d} \quad (3)$$

式中: P_{edge} , Q_{edge} 分别为发电机励磁电流约束下,输出的有功功率、无功功率可行域边界; E_q , E_t 分别为同步发电机的空载电动势和气隙电势; X_d 为同步发电机的直轴同步电抗; δ_i 为发电机的功角。

1.2.3 AA-CAES 调相模式运行可行域

AA-CAES 调相模式的运行可行域为电枢电流

极限和励磁电流极限约束下的可行域的交集,在 $P-Q$ 上,该可行域如图 2 所示。

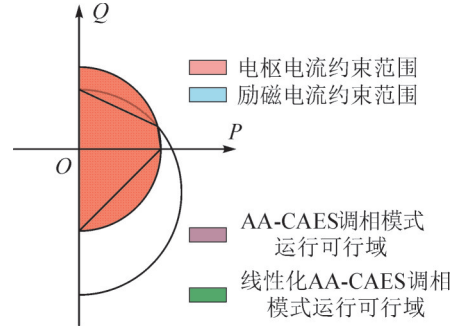


图2 AA-CAES 调相模式运行可行域
Fig. 2 The feasibility domain of var support mode operation for AA-CAES

为便于计及调相模式的 AA-CAES 选址定容模型的求解,需对该可行域进行线性化,为尽量减少因为线性化而削减掉的可行域造成配置结果失准,本文采用几个端点之间的连线作为线性可行域,即

$$\begin{cases} 0 \leq P \leq \frac{1}{a} \left(Q - \frac{E_q E_t}{X_d} - \frac{E_t^2}{X_d} \right), Q_1 \leq Q \leq Q_2 \\ 0 \leq P \leq \frac{Q}{b} + S, Q_2 \leq Q \leq Q_3 \\ 0 \leq P \leq Q + S, Q_3 \leq Q \leq Q_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中, a , b 为根据同步发电机参数确定的系数,具体公式为

$$a = \frac{\frac{E_q^2 - 3E_t^2 - 2E_q E_t}{2X_d} - \frac{S^2 X_d}{2E_t^2}}{\sqrt{S^2 - \left(\frac{E_q^2 - E_t^2}{2X_d} - \frac{S^2 X_d}{2E_t^2} \right)^2}} \quad (5)$$

$$b = \frac{\frac{E_q^2 - E_t^2}{2X_d} - \frac{S^2 X_d}{2E_t^2}}{\sqrt{S^2 - \left(\frac{E_q^2 - E_t^2}{2X_d} - \frac{S^2 X_d}{2E_t^2} \right)^2} - S} \quad (6)$$

式中, Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 为对应的无功功率输出边界,具体公式为

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{E_q^2 - E_t^2}{2X_d} - \frac{S^2}{2E_t^2} X_d \\ Q_2 &= \frac{E_q E_t}{X_d} + \frac{E_t^2}{X_d} \\ Q_3 &= 0 \\ Q_4 &= -S \end{aligned} \quad (7)$$

式中: E_q , E_t 分别为同步发电机的励磁电势和端电压; X_d 为同步发电机的直轴同步电抗; S 为同步发电机的视在功率额定值。

2 计及调相模式的AA-CAES选址定容策略

2.1 约束条件

AA-CAES可以在传统充放电模式和调相模式之间灵活切换,储气库储存的能量也受到两种工作模式的总和影响,即

$$E_{t+1} = E_t + \Delta E_1 + \Delta E_2 \quad (8)$$

式中: E_t 表示 t 时刻储气库中储存的能量, ΔE_1 , ΔE_2 分别表示 AA-CAES 处于传统充放电模式和调相模式对储气库所储能量的影响。同时,储气库能够储存的能量受到储气库本身的安全约束限制,即

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (9)$$

式中: $E_{\min}$, $E_{\max}$ 分别为储气库允许的最小储存能量和最大储存能量。为了不影响 AA-CAES 的连续调度,需要使每日的工作不对储气库所储能量产生影响,即

$$E_T = E_0 \quad (10)$$

式中, T 为每个调度周期的长度。

在充电时,储气库压力上升,储存的能量提高;在放电时,储气库压力下降,储存的能量减少。这一形为与传统电池类似,文献[21]根据这一思路,并引入了效率修正,提出了 AA-CAES 的类电池模型。但是这种模型没有考虑到 AA-CAES 运行的物理实际过程,部分情况下对 AA-CAES 的储能能力估计过于乐观,于是文献[22]提出了一种兼顾储热库和储气库的双 SOC 模型。该模型能够较为准确地描述 AA-CAES 的储能能力,但是计算较为复杂。文献[23]基于气热的最优配合控制,将双 SOC 模型简化为只考虑储气库的单 SOC 模型,不仅估算准确,而且计算简单,本文采用该方法对 AA-CAES 的状态变化进行描述。

储气库储存能量会随着充电、放电动作而变化,即

$$\Delta E_1 = \Gamma^{\text{ac}}(E_t, P_t^{\text{c}}) \Delta t - \Gamma^{\text{ad}}(E_t, P_t^{\text{d}}) \Delta t \quad (11)$$

同时,充放电功率受到储气库储存能量和机械自身的限制,即

$$\mu_t^{\text{c}} \Phi_{\min}^{\text{c}}(E_t) \leq P_t^{\text{c}} \leq \mu_t^{\text{c}} \Phi_{\max}^{\text{c}}(E_t) \quad (12)$$

$$\mu_t^{\text{d}} \Phi_{\min}^{\text{d}}(E_t) \leq P_t^{\text{d}} \leq \mu_t^{\text{d}} \Phi_{\max}^{\text{d}}(E_t) \quad (13)$$

$$0 \leq P_t^{\text{c}} \leq P_{\max}^{\text{c}}, 0 \leq P_t^{\text{d}} \leq P_{\max}^{\text{d}} \quad (14)$$

式中: E_t 为 t 时刻时储气库中储存的能量; P_t^{c} , P_t^{d}

分别为 t 时刻的充放电功率; Γ^{ac} , Γ^{ad} 分别为充、放电特性函数,分别反应了充放电功率与储气库储存能量之间的关系; $\Phi_{\min}^{\text{c}}$, $\Phi_{\max}^{\text{c}}$, $\Phi_{\min}^{\text{d}}$, $\Phi_{\max}^{\text{d}}$ 则分别反应了储气库储存能量对充、放电功率上下限的影响; μ_t^{c} , μ_t^{d} 分别为表征 AA-CAES 是否在充放电的布尔变量,其为 1 时 AA-CAES 处于充、放电状态,为 0 时则不处于对应的充、放电状态; $P_{\max}^{\text{c}}$, $P_{\max}^{\text{d}}$ 分别为压缩机和透平机运行的最大功率。

AA-CAES 在压缩充电时、既不充电也不放电时可以利用储气库释放出的小气流驱动透平机低功率运行,发出的无功功率并网,为电网提供电压支撑^[11,16]。这种运行模式也会消耗一定的储气库中储存的能量,即

$$\Delta E_2 = -\Delta E \mu_t^{\text{p}} \quad (15)$$

式中: μ^{p} 为表征 AA-CAES 在 t 时刻是否处于调相模式的布尔变量,即其为 1 时 AA-CAES 进行调相运行,否则不进行调相运行。因为 AA-CAES 不能够同时处于膨胀发电和调相运行两种运行模式,所以 AA-CAES 的运行受到如下的逻辑约束:

$$\mu_t^{\text{d}} + \mu_t^{\text{p}} \leq 1 \quad (16)$$

同时,AA-CAES 一般可以在 15 min 内完成工况切换。得益于较快的工况切换速度,本文暂不考虑两者切换时间的约束,仅考虑其稳态约束。

本文采用布尔变量数组 u 来描述某个节点是否建造 AA-CAES 电站,其长度为电网的节点数。引入选址信息后,上述约束需要重新改写,公式为

$$u_i E_{\min} \leq E_{i,t} \leq u_i E_{\max} \quad (17)$$

$$\Delta E_{1,i} = [\Gamma^{\text{ac}}(E_{i,t}, P_{i,t}^{\text{c}}) \Delta t - \Gamma^{\text{ad}}(E_{i,t}, P_{i,t}^{\text{d}}) \Delta t] u_i \quad (18)$$

$$u_i \mu_{i,t}^{\text{c}} \Phi_{\min}^{\text{c}}(E_{i,t}) \leq P_{i,t}^{\text{c}} \leq u_i \mu_{i,t}^{\text{c}} \Phi_{\max}^{\text{c}}(E_{i,t}) \quad (19)$$

$$u_i \mu_{i,t}^{\text{d}} \Phi_{\min}^{\text{d}}(E_{i,t}) \leq P_{i,t}^{\text{d}} \leq u_i \mu_{i,t}^{\text{d}} \Phi_{\max}^{\text{d}}(E_{i,t}) \quad (20)$$

$$\Delta E_{2,i} = -\Delta E \mu_{i,t}^{\text{p}} \quad (21)$$

$$\mu_{i,t}^{\text{d}} + \mu_{i,t}^{\text{p}} \leq 1 \quad (22)$$

需要注意的是,作为表征 AA-CAES 工作状态的布尔变量, μ^{c} , μ^{d} , μ^{p} 在节点 i 没有建设 AA-CAES 时对应分量均应为 0,即

$$\mu_{i,t}^{\text{c}}, \mu_{i,t}^{\text{d}}, \mu_{i,t}^{\text{p}} \leq u_i \quad (23)$$

2.2 电网模型

本文主要考虑 AA-CAES 在配电网中的选址定容工作,所以采用 DistFlow 模型来描述电网。该模

型最早由 Baran 等人提出,后由 Farivar 等人证明为一种精确的算法^[24-25],现已成为配电网电压控制的基本模型^[26-27]对于一条从节点 i 出发到节点 j 的线路,线路上的有功、无功潮流与线路上的电流、节点电压之间关系为

$$P_j = P_i - r_j \tilde{I}_{ij}^t - P_{L,j} \quad (24)$$

$$Q_j = Q_i - x_j \tilde{I}_{ij}^t - Q_{L,j} \quad (25)$$

$$\tilde{U}_j^t = \tilde{U}_i^t - 2(r_j P_i + x_j Q_i) + (r_j^2 + x_j^2) \tilde{I}_{ij}^t \quad (26)$$

$$\tilde{I}_{ij}^t = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{\tilde{U}_i^t} \quad (27)$$

式中: P_i 、 P_j 、 $P_{L,j}$ 分别为节点 i 、 j 流出的有功功率和节点 j 的有功负荷; Q_i 、 Q_j 、 $Q_{L,j}$ 分别为节点 i 、 j 流出的无功功率和节点 j 的无功负荷; r_j 、 x_j 为线路上的电阻与电抗; $\tilde{U}_i^t$ 、 $\tilde{I}_{ij}^t$ 分别为节点 i 电压的平方与线路电流的平方。式(27)使得电网模型非凸,难以求解,DistFlow 将其进行了二阶锥松弛,即

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_i \\ 2Q_i \\ \tilde{I}_{ij}^t - \tilde{U}_i^t \end{bmatrix} \right\| \leq \tilde{I}_{ij}^t + \tilde{U}_i^t \quad (28)$$

此时,电网模型被松弛为了一个二阶锥模型。

2.3 目标函数

独立 AA-CAES 电站的收益模式为利用峰谷电价获利以及参与辅助服务市场获取无功补偿补贴。AA-CAES 电站的容量一般不足以影响市场价格,一般以价格接受者(Price Taker)^[28]的身份参与辅助服务市场。

独立 AA-CAES 电站的成本包含初始建造成本与每日机组启动的成本。利用折现率这一概念,可以将初始建设成本折合至每一个调度日。综合考虑独立 AA-CAES 电站的成本与收益,可以得到 AA-CAES 电站每日自调度计划制定的目标函数,公式为

$$\min C = C^{\text{build}} + C^c + C^d - C^p - C^Q \quad (29)$$

式中, C^{build} 、 C^c 、 C^d 、 C^p 、 C^Q 分别为建设成本折合至每一天的成本,每日压缩机的启动成本,每日透平机的启动成本,每日电力市场获利与每日无功补偿辅助服务市场获利。根据折现率理论, C^{build} 的具体表达式为

$$C^{\text{build}} = \frac{1}{365} (f^c P_{\max}^c + f^d P_{\max}^d + f^{\text{as}} V^{\text{as}} + f^{\text{hs}} Q^{\text{hs}}) \frac{\alpha(1+\alpha)^T}{(1+\alpha)^T - 1} \quad (30)$$

式中: f^c 、 f^d 、 f^{as} 、 f^{hs} 分别为单位压缩机功率、单位透平机功率、单位储气库能量储存容量、单位储热库能量储存容量所需成本; α 为折现率; T_y 为设备的全生命周期年数。在本文的假设中,储气与储热进行最优配合,无需独立考虑储热库的成本,只需与储气库进行匹配,并将系数 f^{as} 修正即可。所以,式(30)修正为

$$C^{\text{build}} = \frac{1}{365} [f^c P_{\max}^c + f^d P_{\max}^d + f^{\text{as}} \max(E_{i,t})] \frac{\alpha(1+\alpha)^T}{(1+\alpha)^T - 1} \quad (31)$$

C^c 、 C^d 的计算公式类似,具体公式为

$$C^c = \sum_{t=1}^T S_t^c, S_t^c = \begin{cases} S^c, u_t^c = 0 \wedge u_{t+1}^c = 1 \\ 0, \text{其他情况} \end{cases} \quad (32)$$

$$C^d = \sum_{t=1}^T S_t^d, S_t^d = \begin{cases} S^d, u_t^d = 0 \wedge u_{t+1}^d = 1 \\ 0, \text{其他情况} \end{cases} \quad (33)$$

AA-CAES 电站每日的有功收益与无功收益取决于当日并网的有功电量与无功电量,即

$$C^p = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T c^p (P_{i,t}^d - P_{i,t}^c) \quad (34)$$

$$C^Q = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T c^Q |Q_i| \quad (35)$$

2.4 求解算法

综合考虑目标函数式(30)、约束式(11)–(28)等,可以得到计及调相模式的 AA-CAES 选址定容模型,但是其中包含很多非线性项,需要进行线性化后才能计算,说明如下。

1) 双线性项的处理

式(12)等中包含了如 $u_i P_{i,t}^c$ 的双线性项,可以使用大 M 法进行线性化。引入辅助变量 $\tilde{P}_{i,t}^c$ 并添加如下约束:

$$\tilde{P}_{i,t}^c \leq M u_i, \tilde{P}_{i,t}^c \leq P_{i,t}^c \quad (36)$$

$$\tilde{P}_{i,t}^c \geq P_{i,t}^c - M(1 - u_i) \quad (37)$$

式中: M 为一个很大的常数。其他类似的双线性项都可以使用类似的方法处理,此处不再赘述。

2) minmax 型目标函数的处理

在式(30)中,使用了每日储气库的最大储存容量作为储气库的容量,并在完整的目标函数中将其最小化,即产生了一个形如 $\min(\max f^{\text{as}} E_{i,t})$ 的结构,该结构较为特殊,不能够直接求解,需要进行线性化。引入辅助变量 z_i , 并引入约束

$$z_i \geq E_{i,t}, \forall t \quad (38)$$

因为最终的优化方向为向最小值优化,故会限

制 z_i 为 $E_{i,t}$ 的最大值。

3) 绝对值的处理

在目标函数式(35)中,引入 AA-CAES 无功出力的绝对值,绝对值也是非线性的,需要进行线性化才能够直接求解。引入辅助变量 $\tilde{Q}_{i,t}$,并添加约束

$$\tilde{Q}_{i,t} \geq Q_{i,t}, \tilde{Q}_{i,t} \geq -Q_{i,t} \quad (39)$$

约束式(39)通过放缩的方式将绝对值项 $|Q_{i,t}|$ 放缩为 $\tilde{Q}_{i,t}$ 。

通过以上的求解方法,计及调相模式的 AA-CAES 选址定容模型已经转化为了一个 MISOCP,该模型可以通过商业求解器 Gurobi 等进行直接求解。

3 算例分析

3.1 参数设置

本文采用改进的 IEEE 33 系统来进行算例验证,该系统节点 25 中接入了一个光伏发电与风电结合的新能源电站,该系统的拓扑结构如图 3 所示。

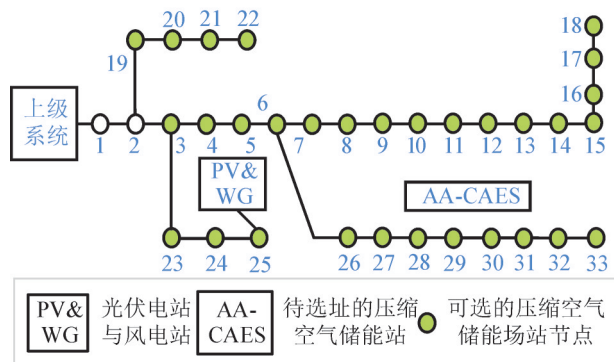


图3 改进 case 33 系统拓扑示意图
Fig. 3 Improved system topological diagram of case 33

本文算例采用等比例法来设置负荷的大小,即每个时间段各个节点的负荷均为标准算例的某个倍数,本文设置的负荷比例如图 4 所示。光伏发电与风电的出力值如图 5 所示。

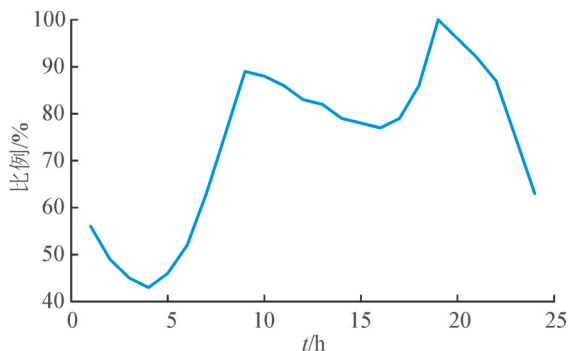


图4 负荷比例设置
Fig. 4 Load ratio setting

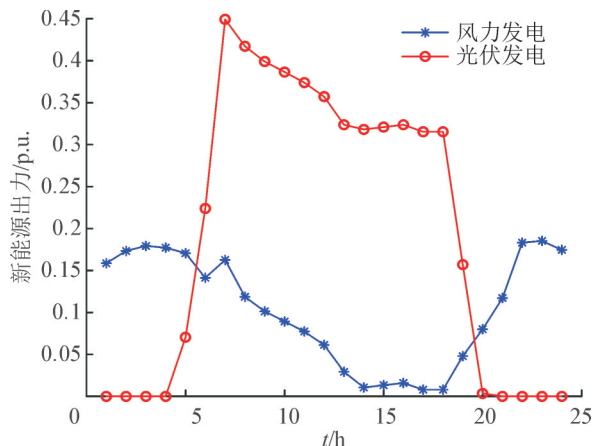


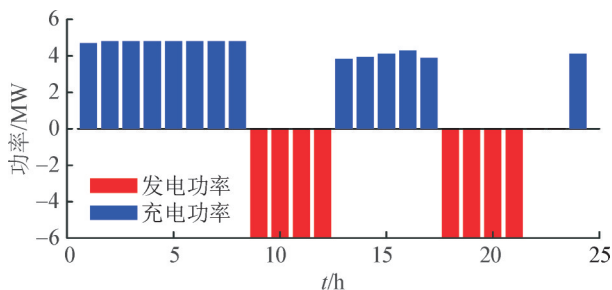
图5 光伏发电与风力发电功率设置
Fig. 5 Power generation capacity setting of photovoltaic power and wind power

3.2 两种选址方案对比

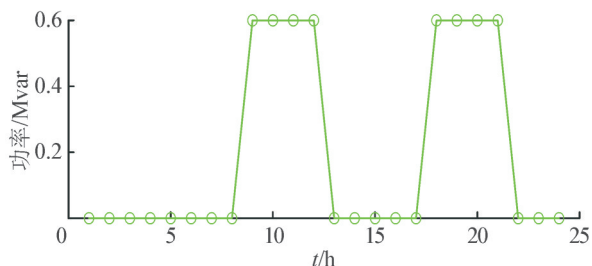
设计方案 1(不考虑电站的调相运行模式)和方案 2(考虑电站的调相运行模式)。在本小节中设置调相补偿收益的单价为 7.82 \$/Mvarh^[29-30]。

对比是否考虑调相模式的 AA-CAES 选址定容结果,结果表明:不考虑电站的调相运行模式时,在节点 25 建设一个充电额定功率 4.806 MW,发电额定功率 6.181 MW 的 AA-CAES 电站的经济效益最好,每天的收益能够达到 2.781 2 万元;考虑电站的调相运行模式时,在节点 3 建设一个充电额定功率 6.063 MW,发电额定功率 3.746 MW 的 AA-CAES 电站的经济效益最好,每天的收益能够达到 2.832 8 万元。

在方案 1 中,电站一天的充放电功率如图 6 所示。



(a) 传统运行模式下 AA-CAES 的充放电功率



(b) 传统运行模式下 AA-CAES 的调相功率

图6 不考虑调相模式时所配置 AA-CAES 的运行情况
Fig. 6 Operation status of AA-CAES without considering the var support mode

可以看到,AA-CAES 电站的主要盈利方式为在谷期和平期充电,在峰期放电,利用峰谷电价差来获利。因为单位容量的 AA-CAES 是可以盈利的,所以选择一个能够容纳最大功率变化的节点即是 AA-CAES 的最佳选址地点,节点 25 建设了新能源电站,所以能够容纳的负荷和出力都比较大,不考虑调相模式时是 AA-CAES 电站的最佳选址地点。

在方案 2 中,电站一天的充放电功率与无功补偿量如图 7 所示。可以看到,与方案 1 相比,为了获得更高的收益,AA-CAES 不仅在发电过程中进行了一定的调相补偿,而且在充电过程中进行了小功率的调相补偿。在 7.82 \$/Mvarh 的补偿价格下,3 节点更小的电力市场被更大的辅助服务市场所弥补,一日内所获利益更大,更适合建设 AA-CAES 电站。

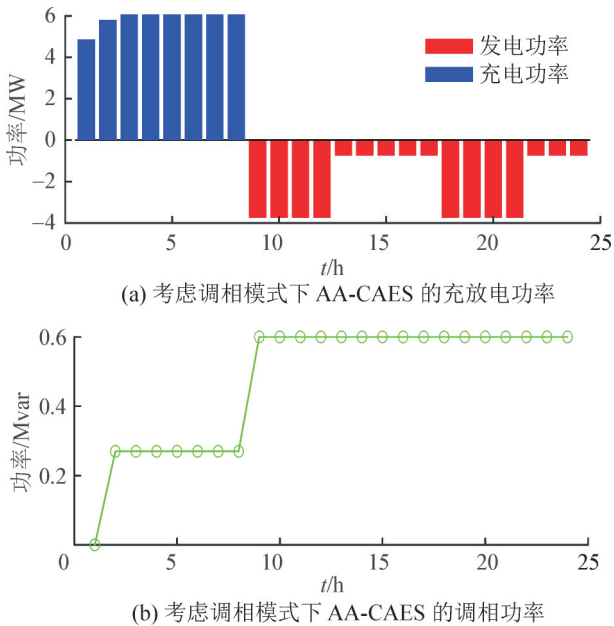


图7 考虑调相模式时所配置AA-CAES 的运行情况
Fig.7 Operation status of AA-CAES with considering the var support mode

另一方面,给予独立储能电站一定的调相补偿收益,激发 AA-CAES 的调相潜力,促进其发出无功功率,还可以有效提高电网的电压安全水平。考虑方案 1、方案 2 和方案 3(不建设 AA-CAES 电站),对比一天内的电压幅值水平如图 8 所示。

在方案 1 中,即不考虑调相模式时,整个电网在一日内的电压幅值平均值为 0.952 9 p.u.,最小值为 0.914 9 p.u.;在方案 2 中,即考虑调相模式时,整个电网在一日内的电压幅值平均值为 0.962 2 p.u.,最小值为 0.927 1 p.u.;在方案 3 中,即不建设 AA-CAES 电站时,整个电网在一日内的电压幅值平均值为 0.948 5 p.u.,最小值为 0.909 8 p.u。可以看到,无论是电压幅值平均值还是电压幅值最小值,

方案 2 都高于另两种方案,即考虑调相辅助服务市场可以有效改善电网中的电压幅值质量。

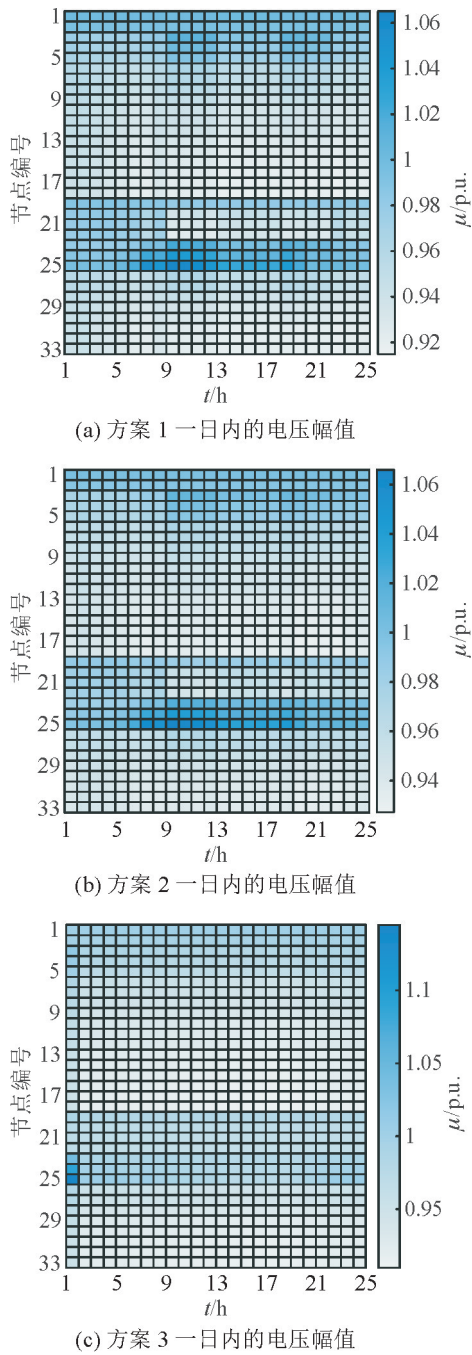


图8 几种方案下的电压幅值
Fig.8 Voltage amplitudes under several schemes

本文通过端点连线方式对 AA-CAES 的运行可行域进行了线性化,但是该方法具有一定的误差,以方案 1 为例,AA-CAES 的膨胀侧功率配置为 6.181 MVA,无功最大出力约为 0.6 Mvar,有功最大出力约为 6.149 MW。可以看到,实际上 AA-CAES 膨胀侧视在功率只需配置为 6.178 MVA 即可,这是因为本文对 AA-CAES 的可行域进行了削减,致使需配置更大的视在功率才能满足现有的运行需

求。但该误差仅有 0.05%,造成的每日收益误差也不超过 0.1%。

3.3 无功补偿价格影响研究

事实上,无功补偿的价格直接影响了 AA-CAES 的日收益,进一步直接影响了 AA-CAES 的选址结果。本节将选取不同的无功补偿单价,对考虑

调相模式的 AA-CAES 选址结果对无功补偿单价的敏感性进行研究。选取方案 4(调相补偿单价为 6.5 \$/Mvarh,电站具备调相运行模式)和方案 5(调相补偿单价为 9 \$/Mvarh,电站具备调相运行模式)与方案 1、方案 2 进行对比。4 种方案的选址结果、无功补偿量、单日收益如表 1 所示。

表 1 不同方案结果对比
Table 1 Comparison of results from different schemes

方案	无功补偿单价/ (\$/Mvarh)	AA-CAES 选址节点	无功补偿量/ MVarh	单日收益/ 万元	压缩侧功率/ MW	膨胀侧功率/ MVA	循环效率/ %	调相消耗气 量比例/%
方案 4	6.50	25	4.80	2.776 6	4.806	6.181	66.7	0
方案 1	7.82	25	4.80	2.781 2	4.806	6.181	66.7	0
方案 2	7.82	3	11.49	2.832 8	6.063	3.746	64.5	3.25
方案 5	9.00	3	11.76	2.950 4	6.062	3.728	64.3	3.55

对比方案 1 和方案 4,可以看到当无功补偿单价较低时,尽管电站可以调相运行,但是较低的无功补偿单价难以弥补调相耗气的损失,AA-CAES 的运行方案也没有发生变化,两者的循环效率也相等。对比方案 1、方案 2 和方案 5,可以看到在无功补偿价格较高时,AA-CAES 改变了自身的运行策略,逐步加大调相模式的使用,此时较高的无功补偿价格已经充分激发了 AA-CAES 的调相潜力,AA-CAES 电站更倾向于牺牲部分循环效率以调相运行,获取更高的收益。

当无功补偿单价为 7.11 \$/MWh 时,AA-CAES 具备调相运行模式与否并不影响其配置结果,收益的差距仅由无功补偿单价造成;当无功补偿单价为 7.12 \$/MWh 时,AA-CAES 具备调相模式时配置收益略高于不具备调相模式时的配置结果。可以推断出,存在一个介于 7.11 \$/MWh 与 7.12 \$/MWh 的临界无功补偿单价,使得 AA-CAES 电站在该电价下是否具备调相运行模式的运行收益相当。

4 结语

本文详细考虑了 AA-CAES 的调相特性,并提出了一种计及调相模式的先进绝热压缩空气储能电站选址定容模型,得到以下结论:

1)先进绝热压缩空气储能因为其和燃气轮机的相似性,具有良好的调相能力。独立 AA-CAES 电站在调相辅助服务市场的激励下,可以很好地发挥其调相潜力,为电网提供电压支撑服务。

2)与不考虑调相模式的选址定容模型相比,在考虑了调相模式后,一方面 AA-CAES 电站可以从调相辅助服务市场中获得更多利润,经济效益得到了提高;另一方面,AA-CAES 电站的选址提高了整

个电网的电能质量,保证了电压水平。

3)提高调相辅助服务市场的单位补偿价格可以更好地刺激 AA-CAES 进行调相服务,一方面可以减少 AA-CAES 开始放电造成的部分节点负荷激增,另一方面可以进一步提高配电网中的电能质量,提供更高的电压支撑能力。

参考文献

[1] 董昱,孙大雁,许丹,等. 新型电力系统电力电量平衡的挑战、应对与展望[J]. 中国电机工程学报. 2025,45(6): 2039-2056.
DONG Yu,SUN Dayang,XU Dan,et al. Challenges,response and prospects for power balance in new power systems[J]. Proceedings of the CSEE. 2025,45(6):2039-2056.

[2] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报,2023,43(1): 158-168.
XIE Xiaorong,MA Ningjia,LIU Wei,et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1):158-168.

[3] 刘春雨. 基于改进 K-means 聚类算法的分布式储能集群划分方法[J]. 东北电力技术,2025,46(1):1-4.
LIU Chunyu. Distributed energy storage cluster partitioning method based on improved K-means clustering algorithm[J]. Northeast Electric Power Technology,2025,46(1): 1-4.

[4] 刘超凡,韩恺,王永真,等. 计及共享储能分布式多能源系统的多目标优化[J]. 电测与仪表,2024,61(10):88-96.
LIU Chaofan,HAN Kai,WANG Yongzhen,et al. Multi-objective optimization of distributed multi-energy system considering shared energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2024,61(10):88-96.

[5] 聂秀珍,焦迎雪,何小刚. 城市载客轨道列车用储能式混合动力牵引[J]. 电池,2025,55(2):307-313.

- NIE Xiuzhen, JIAO Yingxue, HE Xiaogang. Energy storage hybrid traction for urban passenger rail train[J]. Dianchi (Battery Bimonthly), 2025, 55(2): 307-313.
- [6] 黄肖琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 57-64.
- HUANG Xiaoqi, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 57-64.
- [7] 王小昂, 邹鹏, 任远, 等. 山西电力现货市场中长期与现货衔接问题及对策[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 20-27.
- WANG Xiaogang, ZOU Peng, REN Yuan, et al. Problems and solutions of medium & long-term trading connected with electricity spot market in Shanxi province[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 20-27.
- [8] 胡海鹏, 赵平, 李妍, 等. 计及“高龄”光伏出力衰减的配电网储能经济优化配置[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1): 175-182.
- HU Haipeng, ZHAO Ping, LI Yan, et al. Economic optimization configuration of energy storage in distribution network considering the attenuation of aging photovoltaic output[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 175-182.
- [9] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47.
- LIU Xiaochi, MEI Shengwei, DING Ruochen, et al. Current situation, development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 38-47.
- [10] YAO Erren, ZHONG Like, LI Ruixiong, et al. 4E analysis and optimization of a novel combined cooling, heating and power system integrating compressed air and chemical energy storage with internal combustion engine[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62: 106777.
- [11] 崔森, 陈来军, 陈思源, 等. 基于最优动态功率补偿的先进绝热压缩空气储能一次调频控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2433-2441.
- CUI Sen, CHEN Laijun, CHEN Siyuan, et al. Primary frequency modulation control of advanced adiabatic compressed air energy storage based on optimal dynamic power compensation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2433-2441.
- [12] 李广阔, 陈来军, 郑天文, 等. 压缩空气储能系统调相运行模式初探[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(3): 348-354.
- LI Guangkuo, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Preliminary investigation on operation mode of compressed air energy storage system as synchronous condenser[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(3): 348-354.
- [13] 蒋中明, 刘宇婷, 陆希, 等. 压气储能内衬衬室储气关键问题与设计要点评述[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3491-3509.
- JIANG Zhongming, LIU Yuting, LU Xi, et al. Review on key scientific and design issues of lined rock caverns for compressed air energy storage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(12): 3491-3509.
- [14] 吕修业, 蒋俊, 郝宁, 等. 管线钢储气过程热力变化及其对压缩空气储能特性的影响[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 348-354.
- LYU Xiuye, JIANG Jun, HAO Ning, et al. Thermal changes in pipeline steel gas storage process and its influence on compressed air energy storage characteristics[J]. Journal Of Chinese Society Of Power Engineering, 2024, 44(3): 348-354.
- [15] GUO Zhongjie, WEI Wei, CHEN Laijun, et al. Operation of distribution network considering compressed air energy storage unit and its reactive power support capability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2954-2965.
- [16] 崔杨, 于一凡, 付小标, 等. 考虑多热源协同互补的含先进绝热压缩空气储能系统容量配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4195-4205.
- CUI Yang, YU Yifan, FU Xiaobiao, et al. A capacity allocation method for advanced adiabatic compressed air energy storage systems considering the synergistic complementarity of multiple heat sources[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4195-4205.
- [17] 张立伟, 冯任卿, 张毓清, 等. 考虑火电灵活性改造及深度调峰的风光火储系统容量优化配置[J]. 现代电力, 2025, 42(4): 722-733.
- ZHANG Liwei, FENG Renqing, ZHANG Yuqing, et al. Optimal configuration of wind-solar-thermal-storage system capacity considering flexible reconstruction of thermal power and deep peak shaving[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(4): 722-733.
- [18] 王佳旭, 苗世洪, 王廷涛, 等. 考虑调峰-备用-爬坡-惯量多应用价值的大规模先进压缩空气储能多阶段优化规划[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1339-1350.
- WANG Jiaxu, MIAO Shihong, WANG Tingtao, et al. Multi-stage optimization planning of large-scale A-CAES with consideration of multi-application values including peak regulation, backup, ramping and inertia[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1339-1350.
- [19] 王丹, 张甜甜, 吴嘉禾, 等. 大规模压缩空气储能系统发电方式与运行控制分析与构想[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 13-22.

- WANG Dan, ZHANG Tiantian, WU Jiahe, et al. Analysis and conception of power generation mode and operation control of large-scale compressed air energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 13-22.
- [20] LI Guangkuo, CHEN Laijun, XUE Xiaodai, et al. Multi-mode optimal operation of advanced adiabatic compressed air energy storage: explore its value with condenser operation[J]. Energy, 2022, 248: 123600.
- [21] 尹斌鑫, 苗世洪, 李姚旺, 等. 集中-分布式混合压缩空气储能电站优化规划策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 53-64.
- YIN Binxin, MIAO Shihong, LI Yaowang, et al. Modeling and planning strategy for centralized - distributed hybrid compressed air energy storage station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 53-64.
- [22] BAI Jiayu, WEI Wei, CHEN Laijun, et al. Modeling and dispatch of advanced adiabatic compressed air energy storage under wide operating range in distribution systems with renewable generation[J]. Energy, 2020, 206: 118051.
- [23] 马立红, 梁亚峰, 程西, 等. 计及构网型储能稳定拓展的微电网群优化运行[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 214-222.
- MA Lihong, LIANG Yafeng, CHENG Xi, et al. Optimal operation of microgrids considering stabilized expansion of grid-forming energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 214-222.
- [24] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification—part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [25] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification—part II[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2565-2572.
- [26] 陈永进. 基于混合整数凸规划的有源配电网重构与无功电压协调优化[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 21-29.
- CHEN Yongjin. A coordinated optimization for active distribution network reconfiguration and volt/var optimization based on mixed integer convex programming[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 21-29.
- [27] 崔婷婷, 钟庆, 梁怡雪, 等. 配电网串/并联型动态电压恢复器组合优化配置方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 135-142.
- CUI Tingting, ZHONG Qing, LIANG Yixue, et al. Collaborative optimal configuration method for series/parallel dynamic voltage restorers in distribution network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 135-142.
- [28] DRURY E, DENHOLM P, SIOSHANSI R. The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets[J]. Energy, 2011, 36(8): 4959-4973.
- [29] 李广阔, 王国华, 薛小代, 等. 金坛盐穴压缩空气储能电站调相模式设计与分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 91-99.
- LI Guangkuo, WANG Guohua, XUE Xiaodai, et al. Design and analysis of condenser mode for jintan salt cavern compressed air energy storage plant of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 91-99.
- [30] VECCHI A, NAUGHTON J, LI Yongliang, et al. Multi-mode operation of a liquid air energy storage (LAES) plant providing energy arbitrage and reserve services-analysis of optimal scheduling and sizing through MILP modelling with integrated thermodynamic performance[J]. Energy, 2020, 200: 117500.
- 作者简介:**
- 张险峰(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为压缩空气储能发电技术。E-mail: zhang_xianfeng@ctg.com.cn。
- 陈来军(1984—), 男, 副教授, 通信作者, 研究方向为新能源发电与大规模储能技术。E-mail: chenlaijun@tsinghua.edu.cn。
- 史云乾(1996—), 男, 助理工程师, 研究方向为新能源发电与大规模储能技术。E-mail: shi_yunqian@ctg.com.cn。
- 高源(1997—), 男, 助理工程师, 研究方向为压缩空气储能发电技术。E-mail: gao_yuan12@ctg.com.cn。
- 李明明(1990—), 男, 工程师, 研究方向为压缩空气储能发电技术。E-mail: li_mingming@ctg.com.cn。
- 王鸿(1998—), 男, 助理工程师, 研究方向为压缩空气储能发电技术。E-mail: wang_hong17@ctg.com.cn。