

高比例可再生能源背景下移动式储能规划

刘唯, 王奎, 陈锁, 张松浩, 冷佳, 高家敏

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610051)

摘要:分布式可再生能源在配电网中的渗透率不断提升,将影响配电系统的安全稳定运行。作为一种具有时空灵活性的储能系统,移动式储能可提供各类公用事业服务保障配电网的安全稳定运行。为实现合理投资移动式储能,本文提出移动式储能接入位置与容量规划方法。首先,确定影响规划问题的不确定因素,综合考虑各不确定因素自身的时序相关性与相互间的互相关性生成运行场景。而后,构建两阶段随机优化模型,在第一阶段配置移动式储能数量并规划接入位置,第二阶段以不同场景下移动式储能在配电网中经济调度产生的期望效益评估第一阶段优化结果的合理性,并采用遗传算法与优化求解器进行求解。最后,在IEEE-33节点配电网和29节点交通网络中验证模型及算法的有效性。

关键词:移动式储能;接入位置;容量规划;时序相关性;互相关性;随机优化

中图分类号:TM622

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)增1-0013-09

Mobile Energy Storage Planning in the Background of High Percentage Renewable Energy

LIU Wei, WANG Kui, CHEN Suo, ZHANG Songhao, LENG Jia, GAO Jiamin

(Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610051)

Abstract: The increasing penetration of distributed renewable energy in the distribution grid will affect the safe and stable operation of the distribution system. As a kind of energy storage system with spatial and temporal flexibility, mobile energy storage can provide various utility services to guarantee the safe and stable operation of the distribution grid. In order to achieve reasonable investment in mobile energy storage, this paper proposes a mobile energy storage access location and capacity planning method. First, the uncertainties affecting the planning problem are determined, and the operation scenarios are generated by considering the time series correlation of each uncertainty and the mutual correlation between them. Then, a two-stage stochastic optimization model is constructed. In the first stage, the amount of mobile energy storage is configured and the access location is planned; In the second stage, the reasonableness of optimization results in the first stage is evaluated by the expected benefits generated by the economic dispatch of mobile energy storage in the distribution grid under different scenarios, and genetic algorithm and optimization solver are used to solve the problem by using genetic algorithm and optimization solver. Finally, the validity of the model and algorithm is verified in IEEE-33 node distribution grid and 29 node transportation grid.

Keywords: Mobile energy storage; Access location; Capacity planning; Temporal correlation; Mutual correlation; Stochastic optimization

0 引言

伴随着分布式可再生能源在系统中渗透率的升高,其自身存在的随机性、间歇性和波动性等特点将会给配电网的运行调度带来极大的挑战。储能因其能够将电能的生产和消费从时间和空间上分隔开来的能力,而成为一项促进可再生能源消纳的关键支撑技术^[1]。

相较于固定式储能和集群的电动汽车,移动式储能可同时兼顾调度灵活性和可控性。移动式储能由卡车车体和储能系统共同组成^[2]。储能系统集成成了电池组、电池管理系统、控制电路和能量管理系统,根据上级调度指令与配电网进行电能交互。作为一项具有发展前景的储能技术,移动式储能在高比例可再生能源配电网中的规划与运行研究,对保障系统安全经济运行,推进现代化智

收稿日期:2023-07-06

能配电网建设具有重要意义。

目前,针对移动式储能在电网中实现经济调度的优化配置问题,蔡博戎等综合考虑移动式储能实现能源套利、电压调节、延缓配电网升级所产生的效益,对移动式储能的配置数量和额定容量进行优化^[3];Ahmed等结合技术经济性和环境因素构建了一种随机规划模型,对移动式储能、分布式风电/光伏、以及快速充电站等设备的位置和容量进行投资分配^[4]。随着电动汽车的快速发展,交通网与配电网的耦合程度逐渐加深。为保证移动式储能接入位置在两者中均处于最佳位置,本文同时对配电网中可再生能源出力、负荷需求、道路交通流量的不确定性进行刻画,生成及时序相关性和互相关性的数据场景。在配电网常态运行的情况下,构建移动式储能接入位置与容量配置的两阶段随机优化模型。最后,在测试系统中验证模型及算法的有效性。

1 不确定性场景构建

针对可能存在的不确定性因素,即可再生能源出力预测误差、负荷预测误差、交通流量预测误差,采用场景法进行描述,主要步骤分为场景生成与场景削减。

1.1 场景生成

场景生成通过构造有限但数量众多的数据集来近似表征随机变量的概率密度,从而反映不确定性问题自身存在的随机性和波动性^[5]。本节首先对随机变量内部的时序相关性进行分析,通过 Cholesky 分解和拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)生成各不确定因素下具有时序相关性的场景;而后通过 copula 函数描述变量间的相关性,并生成某一时段满足变量间联合概率密度的互相关性场景;在该时段下根据最短距离匹配互相关性场景和时序相关性场景,得到同时符合时序相关性和互相关性的不确定性场景。

1.1.1 变量内部时序相关性处理

将分布式风光出力、负荷功率、交通流量等参数的预测误差定义为不同的随机变量,首先基于 Cholesky 分解原理刻画随机变量自身的时序相关性^[6],而后结合 LHS 抽样方法生成数据场景,实现对每一项不确定因素单独进行时序场景生成。

根据样本数据分析以及相关研究表明,上述四项随机变量在单一时段内均服从正态分布^[7-9]。基于 Cholesky 分解原理,可推导出如下结论,对于服从非标准正态分布的随机向量 X^{cho} 与服从标准正态分布的随机向量 Y^{cho} 具有如式(1)所示的数学关系。

$$X^{\text{cho}} = A^{\text{cho}} Y^{\text{cho}} + X^{\text{cho},M} \quad (1)$$

参照上述推论,通过对标准正态分布进行多次独立的随机抽样,生成随机向量 Y^{cho} 。LHS 具有分层抽样的特点,在保证精准反映随机变量原有概率分布的同时,减少了采样次数,提高效率^[10]。

根据标准正态分布的累积分布函数,采用 LHS 方法进行抽样,在完成随机抽样后,通过式(1)的数学转换关系,得出满足时序相关性的随机场景矩阵 X^{cho} ,每一个不确定因素都将生成一个对应的矩阵。

1.1.2 变量间互相关性处理

不同于变量内部相邻时段数据具有高度的线性相关性,随机变量间的互相关性大多呈现非线性、非对称性等特征。相较于线性相关测度, Copula 函数可以更加全面地描述随机变量间存在的非线性相关结构。基于此,构建多元 Copula 模型刻画四个随机变量的联合概率密度,并生成满足此联合分布的互相关性场景。

此外,求解多元联合概率分布还需了解各随机变量所服从的边缘概率分布,采用高斯核密度估计的方法进行概率密度估计^[11]。

上述变量间互相关性处理过程所采用的样本为各随机变量在同一时段的数据信息,生成的互相关性场景矩阵如下:

$$X^{\text{mu}} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^{\text{mu}} & x_{1,2}^{\text{mu}} & \cdots & x_{1,N}^{\text{mu}} \\ x_{2,1}^{\text{mu}} & x_{2,2}^{\text{mu}} & \cdots & x_{2,N}^{\text{mu}} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{F,1}^{\text{mu}} & x_{F,2}^{\text{mu}} & \cdots & x_{F,N}^{\text{mu}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 X^{mu} 表示互相关性场景矩阵; F 表示随机变量个数。

假设互相关性场景所采用样本的时段为 K ,并根据互相关性场景中某一随机变量 F 的行向量 $X_F^{\text{mu}}: [x_{F,1}^{\text{mu}}, x_{F,2}^{\text{mu}}, \dots, x_{F,N}^{\text{mu}}]$,找到相应时段下随机变量 F 在时序性场景矩阵中的行向量 X_K^{cho} :

$[x_{K,1}^{cho}, x_{K,2}^{cho}, \dots, x_{K,N}^{cho}]$ 。将两个行向量中的元素按最短距离进行匹配,并用 X_F^{mu} 的数据替换 X_K^{cho} 中的数据,而后以随机变量 F 在时序性场景矩阵中剩余时段的数据对进行数据填充,得到同时具有时序性和互相关性的预测误差场景。

$$\forall i_1, i_2, \dots, i_N \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1}^{cho} & x_{1,2}^{cho} & \dots & x_{1,N}^{cho} \\ x_{2,1}^{cho} & x_{2,2}^{cho} & \dots & x_{2,N}^{cho} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{K-1,1}^{cho} & x_{K-1,2}^{cho} & \dots & x_{K-1,N}^{cho} \\ x_{F,i_1}^{mu} & x_{F,i_2}^{mu} & \dots & x_{F,i_N}^{mu} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$|x_{F,i_1}^{mu} - x_{K,i_1}^{mu}| = \min \left(|x_{F,i_1}^{mu} - x_{K,1}^{mu}|, |x_{F,i_1}^{mu} - x_{K,2}^{mu}|, \dots, |x_{F,i_1}^{mu} - x_{K,N}^{mu}| \right) \quad (4)$$

最后,将求得的预测误差数值与预测值求和,获取 LHS 所生成的场景值。

1.2 场景削减

场景分析技术通常生成数量庞大的初始场景集来近似表征不确定性因素的概率密度,但是庞大的场景数量可能会导致“维数灾”,增加问题求解的计算负担从而降低求解效率,进行场景削减是解决该问题的有效途径之一,在减少场景数量的同时尽可能维持采样样本的拟合精度,确保削减后的场景集合仍能对原概率分布进行良好地刻画。常用的场景削减方法主要分为聚类法^[12]和选择法^[13],其中选择法包含了前向选择法和后向削减法。由于前向选择法的选取流程可能致使削减后的场景信息失真^[14],采用后向削减法对随机场景进行处理。

1.3 场景评价指标

采用“场景覆盖率”^[15]“相邻时段相关系数近似性”^[16]“相关性平均误差”^[16]三项指标判断生成场景的质量。

1.3.1 场景覆盖率

该指标用于评判真实数据样本落入生成场景数据范围内的概率,指标值越高,说明生成的场景范围越贴近真实情况。

$$\begin{cases} I^{cover} = \frac{1}{K \cdot N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N A_{k,n} \\ A_{k,n} = 1 \quad \text{if } x_{k,n}^{sample} \in [\min(X_k), \max(X_k)] \\ A_{k,n} = 0 \quad \text{if } x_{k,n}^{sample} \notin [\min(X_k), \max(X_k)] \end{cases} \quad (5)$$

式中 I^{cover} 即为场景覆盖率; $A_{k,n}$ 为 0—1 变量,当 k 时段的真实样本数据在场景数据范围内时,该值为 1,否则为 0; $x_{k,n}^{sample}$ 表示 k 时段第 n 个真实数据样本。

1.3.2 相邻时段时序近似性

该指标用于评判相邻时段各随机变量时序相关性与实际样本数据时序相关性的近似程度。该指标越小,表明场景数据间的时序相关性越真实。

$$I^{apro} = |p_{k,k+1}^{sample} - p_{k,k+1}| \quad (6)$$

式中 I^{apro} 表示相邻时段时序近似性; $p_{k,k+1}^{sample}$ 表示真实样本数据在 k 和 $k+1$ 时段间的 Pearson 相关系数; $p_{k,k+1}$ 表示场景数据在 k 和 $k+1$ 时段间的 Pearson 相关系数。

1.3.3 相关性平均误差

该指标用于表征场景数据相关性矩阵与实际数据相关性矩阵间的差异。时序相关性采用 Pearson 相关系数,变量间的互相关性多呈非线性关系,故而采用度量变量间单调相关性的 Kendall 秩相关系数作为测度指标^[17]。该指标越小,表明场景数据的相关性越符合客观规律。

$$I_{time}^{error} = \frac{1}{K^2} \sum_{k=1}^K \sum_{k'=1}^K |p_{k,k'}^{sample} - p_{k,k'}| \quad (7)$$

$$I_{mutual}^{error} = \frac{1}{F^2} \sum_{a=1}^F \sum_{b=1}^F |\gamma_{a,b}^{sample} - \gamma_{a,b}| \quad (8)$$

式中, I_{time}^{error} 表示时序相关性平均误差; I_{mutual}^{error} 表示互相关性平均误差; $\gamma_{a,b}^{sample}$ 表示真实样本数据在随机变量 a 和随机变量 b 间的 Kendall 相关系数; $\gamma_{a,b}$ 表示场景数据在随机变量 a 和随机变量 b 间的 Kendall 相关系数。

2 两阶段随机优化模型

随机优化通过对随机变量的概率分布进行场景抽样,即可转化为多个场景下的确定性问题。故在第 1 节所述方法获取随机场景后,构建两阶段随机规划模型优化配置移动式储能容量和接入位置。第一阶段模型用于设计移动式储能的接入位置以及配置容量,第二阶段模型在各类典型场景下调度移动式储能,用于求解第一阶段模型的优化结果在典型场景下的期望效益,以评估第一阶段优化结果的优劣性。

2.1 目标函数

目标函数为最大化运营商的等年值利润。成本计算包含了等年值投资成本和日运行成本,投

资成本主要包含四个方面:(1)卡车投资成本;(2)移动式储能功率成本;(3)移动式储能容量成本;(4)移动式储能接入位置建设成本。运行成本主要包含(1)向上级电网的购电成本;(2)移动式储能的维护成本,囊括了储能系统和卡车车体二者的维护成本;(3)弃风弃光惩罚成本;(4)人工费用。收益来源于运营商向用户所出售的电能,运营商从能源市场以批发电价购入电能,再以销售电价将电能出售给用户,其间的价格差构成了运营商的主要收益。运营商可通调度移动式储能执行负荷转移,实现能源套利。

$$\max C^{\text{DNO}} = -\overbrace{(C^{\text{Inv}} - F^{\text{RV}}) \delta^{\text{CR}}}^{\text{第一阶段}} + E[\overbrace{Q(x, \tilde{\xi})}]^{\text{第二阶段}} \quad (9)$$

$$C^{\text{Inv}} = \omega^{\text{pow}} S^{\text{MESS}} + \omega^{\text{cap}} E^{\text{MESS}} + \omega^{\text{car}} N^{\text{MESS}} + \sum_{i=1}^D \omega^{\text{AP}} N_i^{\text{AP}} \quad (10)$$

$$F^{\text{RV}} = \delta^{\text{RV}} C^{\text{Inv}} \quad (11)$$

$$\delta^{\text{CR}} = \frac{\delta(1+\delta)^y}{(1+\delta)^y - 1} \quad (12)$$

式中 C^{DNO} 即为运营商的等年值利润; C^{Inv} 表示移动式储能的投资成本,其中又包含了储能系统的投资成本、卡车的投资成本以及接入位置的建设成本; F^{RV} 表示移动式储能设备的回收残值; δ^{CR} 表示资金回收系数; δ^{RV} 表示设备的残值率; $E[\cdot]$ 表示第二阶段目标函数的期望值算子; ω^{pow} 表示移动式储能的单位功率成本; S^{MESS} 表示移动式储能的配置功率; ω^{cap} 表示移动式储能的单位容量成本; E^{MESS} 表示移动式储能的配置容量; ω^{car} 表示一辆卡车的售价; N^{MESS} 表示移动式储能的配置数量; D 表示配电网节点数; ω^{AP} 表示单个移动式储能接入位置的建设费用; N_i^{AP} 为 0-1 变量,用于指示是否在配电网节点 i 处建设移动式储能接入位置; C^{Pro} 表示运营商的运营利润; D^{MESS} 表示移动式储能的调度天数; δ 表示贴现率; y 表示移动式储能的投资规划周期。

第二阶段的期望值算子通过计算削减后各场景下的效益进行加权平均近似:

$$E[Q(x, \tilde{\xi})] = D^{\text{MESS}} \sum_{u=1}^{n_{\text{LHS}}} C_u^{\text{Pro}} = D^{\text{MESS}} \sum_{u=1}^{n_{\text{LHS}}} [P_u^{\text{scene}} (C_u^{\text{load}} - C_u^{\text{grid}} - C_u^{\text{O\&M}} - C_u^{\text{curt}} - C^{\text{labor}})] \quad (13)$$

$$C_u^{\text{load}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^D (P_t^{\text{sell}} P_{i,t,u} T_s) \quad (14)$$

$$C_u^{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{buy}} P_{t,u}^{\text{grid}} T_s) \quad (15)$$

$$C_u^{\text{O\&M}} = C_u^{\text{O\&M,E}} + C_u^{\text{O\&M,C}} \quad (16)$$

$$C_u^{\text{O\&M,E}} = C^{\text{ESS}} T_s \sum_{t=1}^T (P_{t,u}^{\text{ch}} - P_{t,u}^{\text{dh}}) \quad (17)$$

$$C_u^{\text{O\&M,C}} = C^{\text{Car}} T_s (T - \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^D z_{l,t,u}) \quad (18)$$

$$C_u^{\text{curt}} = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R (P_{r,t,u}^{\text{curt}} C^{\text{curt}} T_s) \quad (19)$$

式中 u 表示场景索引; C_u^{Pro} 表示第 u 个场景下运营商的运营利润; P_u^{scene} 表示第 u 个场景发生的概率; D^{MESS} 表示一年内移动式储能的调度天数; C_u^{load} 表示第 u 个场景下运营商将电能出售给用户所获取的收益; C_u^{grid} 表示第 u 个场景下运营商从上级电网的购电成本; $C_u^{\text{O\&M}}$ 表示第 u 个场景下移动式储能的运行维护费用,其中又包含了储能系统充放电产生的维护费用和卡车运输产生的维护费用; C_u^{curt} 表示第 u 个场景下弃风弃光的惩罚成本; C^{labor} 表示支付给移动式储能操作人员的劳务费,是一个固定参数; t 表示时间索引; T 表示最大仿真时段数; P_t^{sell} 表示时段 t 内运营商向用户出售电能的单价; i 表示配电网节点索引; D 表示最大配电网节点数; $P_{i,t,u}$ 表示场景 u 下,位于配电网节点 i 处在时段 t 内的有功负荷功率; T_s 表示单位仿真步长; P_t^{buy} 表示时段 t 内运营商向上级电网购买电能的单价; $P_{t,u}^{\text{grid}}$ 表示场景 u 下,上级电网在时段 t 内输送的有功负荷功率,若数值为正,表明上级电网向配电网输电,若数值为负,表明配电网向上级电网送电; l 表示移动式储能接入位置索引; $z_{l,t,u}$ 为一个 0-1 变量,用于指示场景 u 下,移动式储能在时段 t 内是否位于接入位置 l 处,若数值为 1,表明移动式储能位于该接入位置,若数值为 0,表明移动式储能不在该接入位置或处于运输状态; $C_u^{\text{O\&M,E}}$ 表示移动式储能运行过程中储能系统产生的维护费用; $C_u^{\text{O\&M,C}}$ 表示移动式储能运行过程中卡车车体产生的维护费用; C^{ESS} 表示单位充放电容量下储能系统的维护成本; $P_{t,u}^{\text{ch}}$ 表示场景 u 下,移动式储能在时段 t 内的充电功率; $P_{t,u}^{\text{dh}}$ 表示场景 u 下,移动式储能在时段 t 内的放电功率; C^{Car} 表示卡车车体每运输 1 h

所产生的维护费用; r 表示分布式可再生能源的位置索引; R 表示分布式可再生能源的安装数量; $P_{r,t,u}^{\text{curt}}$ 表示场景 u 下, 分布式可再生能源 r 在时段 t 内的削减功率; C^{curt} 表示单位削减电量的惩罚系数。

2.2 约束条件

约束条件分为两个阶段, 第一阶段的约束条件对移动式储能的投资容量上限以及接入位置的建设数量上限进行约束; 第二阶段则根据第一阶段的优化结果, 在规定的接入位置以及移动式储能容量配置下, 对移动式储能在配电网中的调度计划进行约束。

2.2.1 第一阶段约束条件

$$N^{\text{MESS}} \leq N_{\max}^{\text{MESS}} \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^D N_i^{\text{AP}} \leq N_{\max}^{\text{AP}} \quad (21)$$

$$E^{\text{MESS}} = E_0^{\text{MESS}} N_{\max}^{\text{MESS}} \quad (22)$$

$$S^{\text{MESS}} = S_0^{\text{MESS}} N_{\max}^{\text{MESS}} \quad (23)$$

式中 N_{\max}^{MESS} 表示移动式储能投资数量的上限; N_{\max}^{AP} 表示移动式储能接入位置数量的上限; E_0^{MESS} 表示单个商业化移动式储能产品的额定容量; S_0^{MESS} 表示单个商业化移动式储能产品的额定功率。

2.2.2 第二阶段约束条件

将投资后的所有移动式储能视为一个整体进行调度, 约束条件主要分为两类, 一类是配电网运行约束。另一类是移动式储能自身的运行约束, 详见文献^[18]。

配电网运行约束可进一步分为以下几类: ①式(24)至式(29)代表的配电网潮流约束, 此处采用 Dist-Flow 潮流模型, 此模型在配电网运行优化问题中被广泛使用^[19]; ②式(30)代表的配电网关口功率约束; ③式(31)代表的无功补偿设备功率约束; ④式(32)代表的分布式可再生能源出力约束。

$$\forall b \in N_b \quad b = (i, j) \quad i, j, l \in N_i \quad t \in N_t \quad r \in N_r \quad q \in N_q$$

$$\begin{cases} P_{(b \neq 1), t, u} = \sum_{\forall b' \in N_b, b' = \langle j, j' \rangle, j' \neq i, j' \in N_i} P_{b', t, u} + \\ P_{j, t, u} + P_{l, t, u}^{\text{MESS}} - P_{r, t, u} \\ P_{(b=1), t, u} = \sum_{\forall b' \in N_b, b' = \langle j, j' \rangle, j' \neq i, j' \in N_i} P_{b', t, u} + \\ P_{j, t, u} + P_{l, t, u}^{\text{MESS}} - P_{r, t, u} - P_{t, u}^{\text{grid}} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} Q_{(b \neq 1), t, u} = \sum_{\forall b' \in N_b, b' = \langle j, j' \rangle, j' \neq i, j' \in N_i} Q_{b', t, u} + \\ Q_{j, t, u} + Q_{l, t, u}^{\text{MESS}} - Q_{r, t, u} \\ Q_{(b=1), t, u} = \sum_{\forall b' \in N_b, b' = \langle j, j' \rangle, j' \neq i, j' \in N_i} Q_{b', t, u} + \\ Q_{j, t, u} + Q_{l, t, u}^{\text{MESS}} - Q_{q, t, u}^{\text{svc}} - Q_{r, t, u} - Q_{t, u}^{\text{grid}} \end{cases} \quad (25)$$

$$V_{j, t, u}^2 = V_{i, t, u}^2 - 2(r_b P_{b, t, u} + x_b Q_{b, t, u}) + (r_b + x_b)^2 I_{b, t, u}^2 \quad (26)$$

$$I_{b, t, u}^2 = \frac{(P_{b, t, u})^2 + (Q_{b, t, u})^2}{V_{i, t, u}^2} \quad (27)$$

$$I_{b, t, u} \leq I_{\max} \quad (28)$$

$$V_{\min} \leq V_{i, t, u} \leq V_{\max} \quad (29)$$

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{grid}} \leq P_{t, u}^{\text{grid}} \leq P_{\max}^{\text{grid}} \\ Q_{\min}^{\text{grid}} \leq Q_{t, u}^{\text{grid}} \leq Q_{\max}^{\text{grid}} \end{cases} \quad (30)$$

$$Q_{\min}^{\text{svc}} \leq Q_{q, t, u}^{\text{svc}} \leq Q_{\max}^{\text{svc}} \quad (31)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{r, t, u} \leq \hat{P}_{r, t, u} + U_{r, t, u} \\ P_{r, t, u}^{\text{curt}} = \hat{P}_{r, t, u} + U_{r, t, u} - P_{r, t, u} \\ Q_{r, t, u} = P_{r, t, u} \cdot \tan(\arccos(\lambda_r)) \end{cases} \quad (32)$$

式中 N_b 表示配电网支路集合; b 表示首端节点为 i , 末端节点为 j 的一条支路; N_i 表示配电网节点集合; N_t 表示仿真时段集合; N_r 表示分布式可再生能源集合; N_q 表示无功补偿设备集合; $P_{b, t, u}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 支路 b 上流过的有功功率; $P_{j, t, u}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 节点 j 处的有功负荷功率; $P_{l, t, u}^{\text{MESS}}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 移动式储能在接入位置 l 处的有功功率, 若数值为正, 表明移动式储能正在充电, 若数值为负, 表明移动式储能正在放电; $P_{r, t, u}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 分布式可再生能源 r 的有功功率; $Q_{b, t, u}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 支路 b 上流过的无功功率; $Q_{j, t, u}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 节点 j 处的无功负荷功率; $Q_{l, t, u}^{\text{MESS}}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 移动式储能在接入位置 l 处的无功功率, 若数值为正, 表明移动式储能正在吸收无功功率, 若数值为负, 表明移动式储能正在发出无功功率; $Q_{r, t, u}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 分布式可再生能源 r 的无功功率; $Q_{q, t, u}^{\text{svc}}$ 表示场景 u 下时段 t 内, 无功补偿装置 q 的无功功率, 若数值为正, 表明装置正在释放无功功率, 若数值为负, 表明装置正在吸收无功功率; $Q_{t, u}^{\text{grid}}$ 表示场景 u 下, 上级电网在时段 t 内输送的无功负荷功率, 若数值为正, 表明上级电网向配电网输送无功功率, 若数值为负, 表明配电网向上

级电网返送无功功率; $V_{i,t,u}$ 和 $V_{j,t,u}$ 分别表示场景 u 下时段 t 内,配电网节点 i 和节点 j 处的电压; r_b 和 x_b 分别表示支路 b 上的电阻和电抗; $I_{b,t,u}$ 表示场景 u 下时段 t 内,支路 b 上的电流大小; I_{\max} 表示支路电流的上限值; V_{\max} 和 V_{\min} 分别表示节点电压的上限值和下限值; P_{\max}^{grid} 和 P_{\min}^{grid} 分别表示配电网关口有功功率的上限值和下限值; Q_{\max}^{grid} 和 Q_{\min}^{grid} 分别表示配电网关口无功功率的上限值和下限值; Q_{\max}^{svc} 和 Q_{\min}^{svc} 分别表示无功补偿设备功率的上限值和下限值; $\hat{P}_{r,t,u}$ 表示场景 u 下时段 t 内,分布式可再生能源 r 有功功率的预测值; $U_{r,t,u}$ 表示场景 u 下时段 t 内,分布式可再生能源 r 功率的预测误差; λ_r 表示分布式可再生能源 r 的功率因数。

3 模型求解

构建两阶段随机规划模型后,不难发现第二阶段的约束条件中存在二次项,即式(26)至式(29),第二阶段模型是一个混合整数非线性规划(Mixed Integer Nonlinear Programming, MINP)问题。其中,式(27)为一个非凸式,模型的非凸性将导致求解难度极大。加之第二阶段模型涉及到多个典型场景下的求解,为保证求解效率,基于二阶锥松弛技术对上式进行处理,将第二阶段模型转化为混合整数二阶锥规划(Mixed Integer Second Order Cone Programming, MISOCP)问题,便于求解。

3.1 模型处理

3.1.1 二阶锥松弛

利用变量 $v_{i,t,u}$ 和 $i_{b,t,u}$ 分别表示节点电压的平方 $V_{i,t,u}^2$ 和支路电流的平方 $I_{b,t,u}^2$,并将式(27)转换为旋转二阶锥形式。该二阶锥松弛是精确成立的,关于此过程的详细证明可见参考文献^[20-22]。

$$v_{j,t,u} = v_{i,t,u} - 2(r_b P_{b,t,u} + x_b Q_{b,t,u}) + (r_b + x_b)^2 i_{b,t,u} \quad (33)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{b,t,u} \\ 2Q_{b,t,u} \\ v_{i,t,u} - i_{b,t,u} \end{array} \right\|_2 \leq v_{i,t,u} + i_{b,t,u} \quad (34)$$

$$i_{b,t,u} \leq I_{\max}^2 \quad (35)$$

$$V_{\min}^2 \leq v_{i,t,u} \leq V_{\max}^2 \quad (36)$$

3.1.2 线性化处理

为了提升求解速度,将移动式储能的功率限制规定在一个线性化范围内,如图1所示。

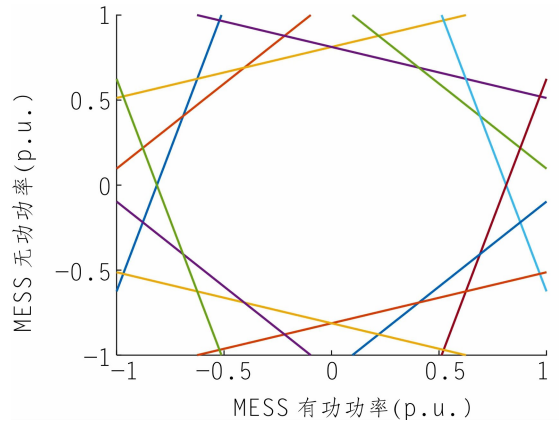


图1 移动式储能功率限制的线性化范围

3.2 求解算法

针对于两阶段随机规划问题的求解,采用GA处理第一阶段与移动式储能配置数量、接入位置相关的整数变量。在给定第一阶段决策变量后,第二阶段可以转化为多个随机场景下的独立子问题,每个场景下的子问题都是一个MISOCP问题,可用商业求解器GUROBI求解^[23-24],在MATLAB软件中采用YALMIP^[25]对MISOCP问题进行建模。当所有场景下的子问题优化求解后,可以得到第二阶段的期望值算子,将结果返还并应用GA指导第一阶段的优化过程,GA通过MATLAB Optimization Tool中算法包实现。求解的详细流程见附录。

4 算例分析

4.1 测试系统

基于如图2所示拓展后的IEEE-33节点配电网^[26]以及如图3所示29节点的交通网^[27]进行算例仿真。

单辆商业化移动式储能产品规格,风电、光伏历史数据来源于^[28],交通流量历史数据来源于^[29],参考已有的研究成果。

GA迭代次数设定为20,种群数量为5,交叉概率为80%,其余设定均为工具箱中的默认值。

4.2 算例结果

4.2.1 场景质量评估

以单独使用LHS而未考虑时序相关性与互相关性所生成的场景作为对照组,与本章方法生成的场景进行对比分析,评估本章方法生成场景

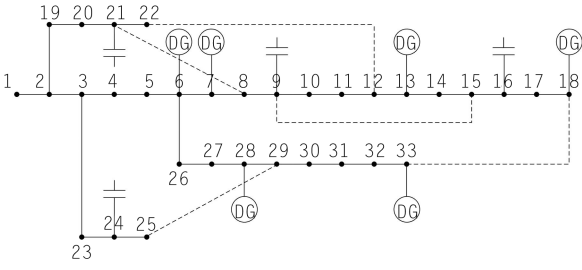


图 2 拓展后的 IEEE-33 节点配电网拓扑图

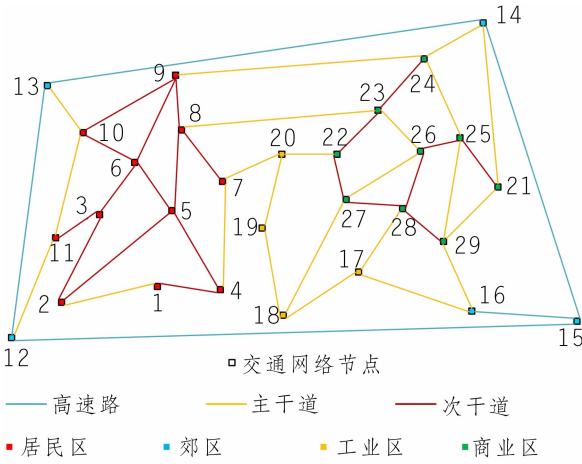


图 3 29 节点交通网拓扑图

的质量。场景生成数量设定为 1 000, 削减后的场景个数设定为 20。

关于两种场景生成方法在各随机变量下生成的场景以及削减后的场景所产生的场景覆盖率指标如表 1 所列。在场景削减前, LHS 生成场景与本章方法生成场景在风电、光伏、负荷及交通流量四项不确定因素下的覆盖率相差不大且均处于高数值。对于削减后的场景, 虽然整体的覆盖率有所下降, 但仍在 80% 以上, 且本章方法场景覆盖率均高于 LHS 削减后场景。

表 1 场景覆盖率对比

覆盖率	LHS 生成场景	LHS 削减后场景	本章方法	削减后场景
风电	0.998 1	0.878 8	0.989 4	0.897 5
光伏	0.972 2	0.811 7	0.988 2	0.936 0
负荷	0.999 2	0.885 2	0.995 5	0.981 4
交通流量	0.978 9	0.882 3	0.985 3	0.892 4

由于随机变量类型较多, 采用风电出力场景作为时序相关性对比的基础数据。如图 4 和图 5 所示, 分别给出两种方法生成的风电场景。通过对比可知, 本章方法生成的风电场景在各时段的功率波动呈现出规律性。如图 6 所示为风电场景

时序相关性的对比, 本章方法生成场景的时序相关性变化与原始数据样本是大致相同的, 而 LHS 生成场景中的数据呈现时序无关。从定量角度分析, 如图 7 所示为相邻时段 pearson 系数差对比, 本章方法生成场景在相邻时的 pearson 系数更贴近历史数据。

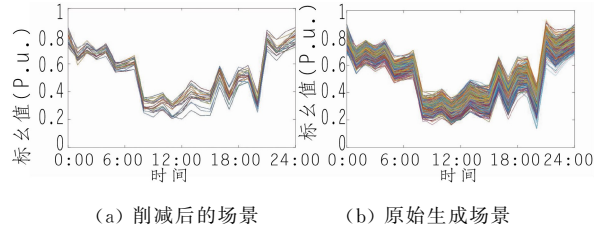


图 4 本文方法生成风电场景

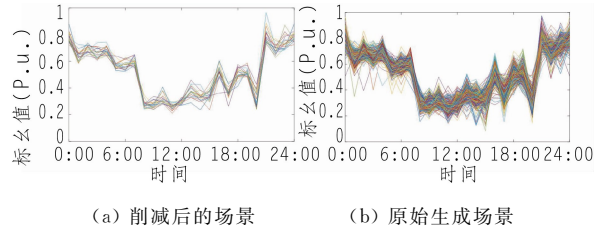
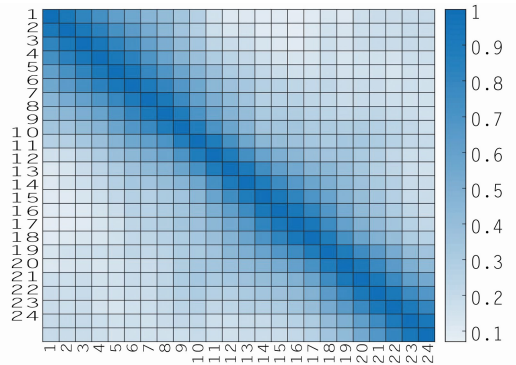
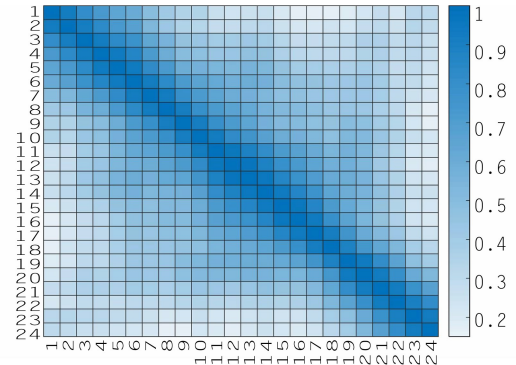


图 5 LHS 法生成风电场景

关于随机变量相关性平均误差变化, 表 2 给出了具体数值, 其中时序相关性平均误差以风电



(a) 数据样本



(b) 本章方法生成场景

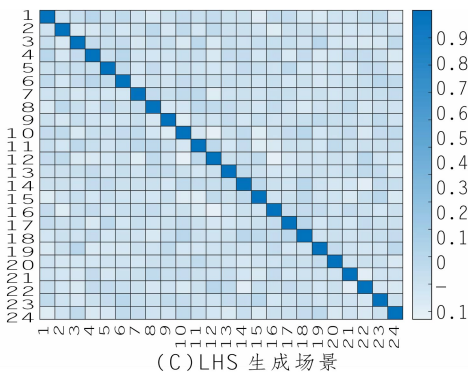


图6 风电场景时序相关性对比

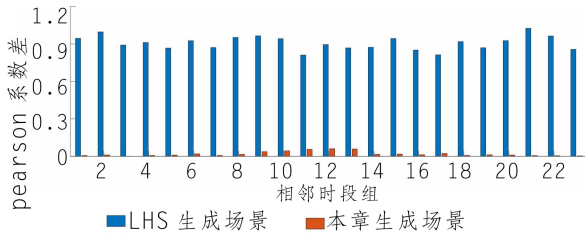


图7 相邻时段 pearson 系数差对比

出力数据进行计算。LHS 场景削减前后与本文方法场景削减前后在时序相关性平均误差中的差异佐证了本章方法对时序相关性刻画更为精准。而针对各随机变量间的互相关性,本章方法对互相关性的刻画也明显优于 LHS。

表2 相关性平均误差对比

项目	LHS生成场景	LHS削减后场景	本章方法	削减后场景
时序相关性平均误差	0.373 6	0.537 7	0.109 3	0.156 2
互相关性平均误差	0.148 1	0.211 4	0.022 1	0.086 1

4.2.2 场景数量影响

由于 GA 求解时间较长,场景数量的变化量以 5 为单位,设定六组对比。如图 8 所示展示了不同场景数量下的优化结果和计算时间。当削减后的场景数量超过 20 个时,模型的优化结果将趋于一个较为稳定的状态。此时,再增加场景数量无法使优化结果得到大幅度提升。当设定值为 30 时,优化结果小幅度向下波动,这是由场景削减过程导致的差异。综上,削减后的场景数量设定为 20 较为合理,如图 9 所示为该设定值下的迭代过程。

4.2.3 移动式储能容量配置与接入位置规划结果

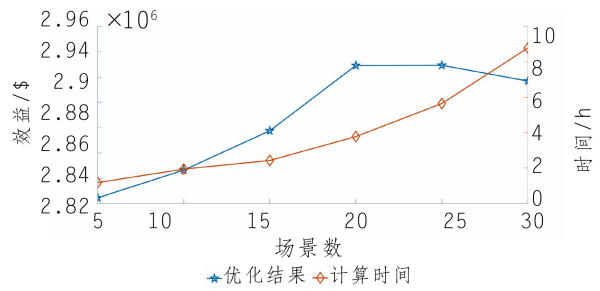


图8 不同场景数量下优化结果与计算时间对比

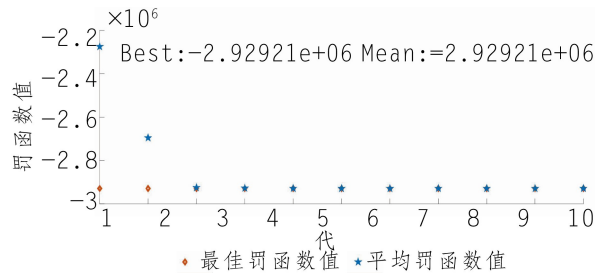


图9 不同场景数量下优化结果与计算时间对比

根据本文方法所求出的移动式储能配置功率/容量与接入位置规划结果如表 3 所列,移动式储能的配置数量为 10 辆。由于在调度过程中将移动式储能车队视为一个整体,因此总的配置功率和容量为 5 MW/10 MWh。接入位置数量规划结果为 2 个,分别在配电网节点 7(交通网节点 6)和配电网节点 12(交通网节点 12)。购置移动式储能和建设接入位置总成本为 4.9×10^6 \$。

表3 移动式储能配置与接入位置规划结果

配置数量	配置功率/容量	接入位置数量	接入位置	总成本/ 10^6 \$
10	5 MW/10 MWh	2	配电网节点 7、12	4.9

为对比随机规划与确定性的优劣,表 4 给出了确定性场景下移动式储能配置和接入位置规划结果。移动式储能的配置数量和容量功率均未变化,但接入位置数量由 2 个升至 3 个,且接入位置也发生了变化。这是由于随机场景中考虑了更多的交通流量场景,当交通流量的波动导致移动式储能接入位置间的运输时间延长时,减少接入位置的建设数量,保证移动式储能有效的充放电时间,会为运营商带来更多效益。

表4 确定性场景规划结果

配置数量	配置功率/容量	接入位置数量	接入位置	总成本/ 10^6 \$
10	5 MW/10 MWh	3	配电网节点 7、15、31	5.1

5 结 语

本文综合考虑了交通—电力耦合网络中多种不确定性因素影响,并在此基础上研究移动式储能接入位置与容量配置的两阶段随机规划模型与求解方法。第一阶段优化规划方案,第二阶段以经济调度的期望效益评估第一阶段方案的合理性。根据算例仿真结果的分析,所得结论如下:

(1)相较于对单个不确定因素采用 LHS 法生成样本并组合数据生成的场景,综合考虑随机变量自身时序相关性与变量间的互相关性所生成的场景更贴近历史数据。构建的场景符合客观事实,为两阶段随机规划问题提供了合理的基础参数。

(2)合理的削减后场景数量在保证优化目标值处于理想状态的同时,还能大幅提高模型的求解效率,避免耗费大量时间换取优化目标的小幅波动。

(3)相较于确定性规划,本章模型能考虑多种不确定性因素的影响,所规划出的结果能够适应大量不同的运行场景,避免额外投资。

参考文献:

[1] 孙伟卿,张婕,叶磊,等.考虑广义储能的电力系统运行弹性优化[J].系统仿真学报,2021,33(4):962-972.

[2] Abdeltawab H, Mohamed A. Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(99): 6828-6840.

[3] 蔡博戎,凌开元,姜华,等.配电网移动储能优化配置研究[J].电工电能新技术,2019,38(9):26-32.

[4] Ahmed H, Sindi H, Azzouz M, et al. Optimal sizing and scheduling of mobile energy storage toward high penetration levels of renewable energy and fast charging stations [J/OL]. IEEE Transactions on Energy Conversion, [2022-02-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9601156>

[5] 周恒旺.考虑微网市场交易影响的配电网可靠性分析[D].桂林:广西大学,2020.

[6] 马博韬.考虑灵活性的含风电—光热电力系统机组组合及在容量扩展规划中的应用[D].重庆:重庆大学,2019.

[7] Bertsimas D, Litvinov E, Sun X, et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 52-63.

[8] 韩雷.基于相关机会目标规划的主动配电网优化调度研究[D].保定:华北电力大学,2021.

[9] 周明.基于路网时空信息的短时交通流预测方法研究[D].北京:北方工业大学,2020.

[10] 蒋浩.电动汽车负荷概率建模及有序充电策略研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[11] Arend M, Schfer T. Statistical power in two-level models; A tutorial based on monte carlo simulation[J]. Psychological Methods, 2018, 24(1): 1-10.

[12] 田亮,谢云磊,周桂平,等.基于两阶段随机规划的热电机组深调峰辅助服务竞价策略[J].电网技术,2019,43(8):2789-2798.

[13] Sklar A. Distribution functions of n dimensions and marginals[J]. Publications of the Institute of Statistics of the University of Paris, 1959, 8(1): 229-231.

[14] 马泽洋.含大规模风电的发—输—配电系统充裕性优化决策研究[D].北京:华北电力大学,2021.

[15] 朱满庭.基于深度学习的风电功率预测研究[D].北京:华北电力大学,2021.

[16] 丁明,解蛟龙,刘新宇,等.面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4064-4072.

[17] 孙春雪.考虑概率生存时间的微网群孤网划分研究[D].北京:北京交通大学,2021.

[18] 孙慧宇.随机规划技术在发电商中长期市场运营策略中的应用研究[D].南京:东南大学,2020.

[19] 王培汀,王丹,贾宏杰,等.考虑随机场景生成及优选技术的分布式能源站选型定容规划研究[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(7):88-100+134.

[20] 胡代豪,郭力,刘一欣,等.计及光储快充一体站的配电网随机—鲁棒混合优化调度[J].电网技术,2021,45(2):507-519.

[21] Farivar M, Low S. Branch flow model; Relaxations and convexification(part I)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.

[22] Taylor J A, Hover F. Convex models of distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1407-1413.

[23] 刘一兵,吴文传,张伯明,等.基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功—无功协调多时段优化运行[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2575-2583.

[24] Gurobi Optimization[EB/OL]. [2022-03-01]. <http://www.gurobi.com/>.

[25] LÖFBERG J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]. //IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, 2004: 284-289.

[26] Holland J. Adaptation in natural and artificial systems [J]. Quarterly Review of Biology 1975, 6(2): 126-137.

[27] Rousis A, Konstantelos I, Strbac G. A planning model for a hybrid AC-DC microgrid using a novel GA/AC opf algorithm[J]. IEEE Transaction on Power System 2020, 35(1): 227-37.

(下转第 59 页)

2.3.4 消谐装置故障原因分析

(1)消谐器在受到过高电压,或较低频率的试验电压施加。PT 施加额定电压 1.3 倍额定电压以上时,消谐器的铁心会饱和,会导致消谐器内部发热受损。

(2)消谐器内部有缺陷,在运行时出现故障。

(3)运输、安装过程中受到震动,导致消谐器故障。

由于 GIS 交接耐压试验时,PT 断口是断开状态,因此不存在 PT 被施加高电压情况。故障原因可能为运输震动或消谐器内部缺陷故障引起。待现场在检修具备条件时,对消谐装置进行更换,将消谐装置返厂进行故障检测,分析故障原因。

3 结 语

(1)杨房沟水电站 GIS 铁磁谐振发生工况均为主变压器运行转检修时,主变高压侧 T 区短引线回路产生 PT 铁磁谐振,由于现场无法实测短引线工况下 GIS 对地电容值,因此采用断路器谐振波形及感应残压波形推算出短引线工况下 GIS 对地电容值方法可行。

(2)仿真分析计算表明,主变高压侧 T 区短引线工况下,扩大断路器并联电容及 GIS 对地电容取值范围,在投入 PT 二次侧消谐器的情况下,均可以有效抑制谐振的发生,证明消谐器设计选型合理。

(上接第 21 页)

[28] 刘宏泰. 基于列车区间运行优化和能馈装置配置的地铁节能技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.

[29] 付康. 采用调谐惯容阻尼器的基础隔震结构的抗震性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.

作者简介:

刘 唯(1997-),男,四川成都人,硕士研究生,从事水电站运维工作;

王 奎(1990-),男,河南洛阳人,中级工程师,学士,从事水电站

(3)为保障 GIS 设备运行过程中不发生铁磁谐振,PT 二次侧消谐器应全程投入运行^[1]。

(4)GIS 前期设计阶段选型 PT 时,一定要进行所有可能性 PT 铁磁谐振的仿真分析计算,同时尽可能选用励磁特性好的 PT,以确保在合闸、分闸及单向接地事故等情况下其铁芯不易饱和,从而在工程建设中消除 GIS 站 PT 铁磁谐振的条件,从根本上避免 PT 铁磁谐振的发生。

(5)电厂应在检修期对 GIS PT 消谐装置进行检查,测试项目应包含绝缘电阻测量、线圈直流电阻测量、消谐器励磁电流测量等,以确保消谐装置安全可靠运行^[2]。

参考文献:

[1] 梁逸帆,危伟,夏向龙等. 500kV GIS PT 铁磁谐振过电压分析及控制措施[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 抽水蓄能电站工程建设文集 2021. 中国水利水电出版社,2021:192-195.

[2] 周勇,黄华,赖见令. 避免 500 kV GIS 开关站 PT 谐振的运行操作方法[J]. 水电站机电技术,2017,40(04):22-25+28.

作者简介:

徐 晖(1990-),男,山东德州人,中级工程师,工学学士,现从事流域电站电气一次设备管理和研究工作;

王亚华(1990-),男,福建建阳人,中级工程师,工学学士,现从事流域电站战略方向研究与管理工;

汪江昆(1986-),男,新疆博乐人,高级工程师,工学学士,现从事流域电站电气一次设备管理和研究工作.

(责任编辑:史心雨)

运维工作;

陈 锁(1996-),男,吉林农安人,助理工程师,学士,从事水电站运维工作;

张松浩(1994-),男,河北冀州人,助理工程师,学士,从事水电站运维工作;

冷 佳(1996-),男,四川绵阳人,助理工程师,学士,从事水电站运维工作;

高家敏(1997-),男,湖北孝昌人,助理工程师,学士,从事水电站运维工作.

(责任编辑:史心雨)

本刊启事

《四川水力发电》杂志系国内外公开发行的中文期刊,《四川水力发电》编辑部是唯一的编辑出版单位。本刊从未委托任何中介公司代理稿件推荐工作,更未委托其代收稿件版面费,特此声明。恭请广大作者注意,以免上当受骗,造成不必要的损失。

《四川水力发电》投稿邮箱:scsd50@163.com。 《四川水力发电》编辑部地址:四川省成都市青羊区浣花北路 1 号
官 网:http://www.scsfld.com 电 话:028-62009589 邮 编:610072

《四川水力发电》编辑部