

[孤网]

新能源孤网系统的稳态仿真研究

文/余淼¹ 谢君² 刘宁³

1. 东华工程科技股份有限公司; 2. 宁德时代未来能源(上海)研究院有限公司; 3. 合肥工业大学

根据实际项目情况, 结合现有的资料参数, 运用PSCAD/EMTDC软件搭建新能源孤网系统模型。针对不同的稳态运行工况, 运用建模仿真手段验证分析各种方式下的出力特性及频率特性。提出源网荷储一体化综合能源供应项目的孤网运行策略、储能配置的合理性和可行性建议。

随着我国可再生能源装机量的迅速增加, 新能源发电量呈现出快速递增的趋势, 建立包含新能源发电系统在内的新型电力系统的需求剧增^[1]。传统意义上孤网是孤立电网的简称, 一般泛指脱离大电网的小容量电网。简单来说, 就是自发自用, 自成体系, 完全与大电网脱离^[2]。在新能源孤网系统中, 取代传统的燃煤或燃气发电机组, 电源则主要来自风电、光伏或光热发电等新能源发电系统。

文献[3]对风储孤网系统建立各个模块的数学模型和控制系统数学模型。在电磁暂态仿真平台PSCAD环境中, 基于所建立的数学模型搭建相应的电磁暂态仿真模型。通过仿真研究风储孤网系统的自启动特性和系统稳定性。

项目背景

由于本项目地处偏远地区, 项目所在地短期内无法提供稳定的电力支撑。因此, 系统在很长一段时间内将运行于典型的源网荷储孤网系统。配置情况见表1。

表1 源网荷储配置情况

类别	项目	说明
电源侧	光热机组	40 MW
	光伏场站	35 MWp
电网侧	主电网	35 kV, 单母线
负荷侧	厂用负荷	32.2 MW
储能侧	磷酸铁锂电池	15 MW/30 MW·h或
		30 MW/30 MW·h

根据项目实际情况, 系统技术路线采用光热结合光伏的综合能源供能系统: 白天主要以光伏供电、光热供汽, 光热机组低负荷运行支撑孤网稳定性需求; 夜晚由光热储能进行供电、供汽。电化学储能主要用于平衡光伏供电波动以及切负荷工况的快速调节。

模型搭建及稳定控制方法

基于电力系统电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC V5.0搭建。为保证测试的顺利进行及结果的可信度, 部分仿真工况将引入调节系数。在PSCAD软件中搭建源网荷储一次拓扑结构模型, 如图1所示。

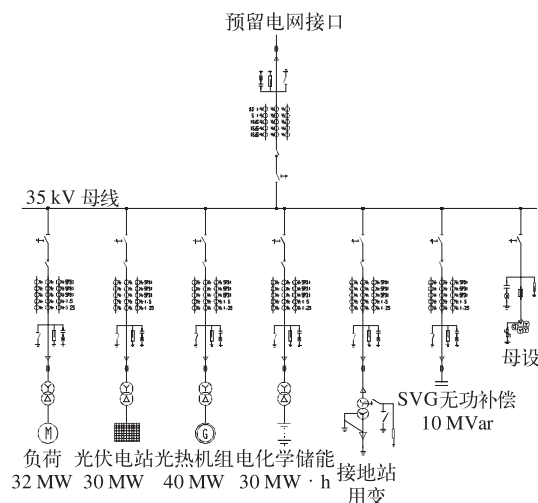


图1 一次拓扑接线图

光热机组模块：汽轮发电机组额定功率为40 MW，可超发至50 MW。励磁系统、调试系统对调压、调频特性起关键性作用，参考GB/T 40595—2021《并网电源一次调频技术规定及试验导则》、GB/T 40589—2021《同步发电机励磁系统建模导则》等相关规定，设定仿真参数。

1) 光伏场站模块。光伏模块通常运行于MPPT模式，以寻求最大化发电功率输出。通过调节光照强度、温度等参数，可模拟仿真光伏发电功率的日内波动情况。

2) 化学储能模块。电化学储能，通常运行于平衡光伏供电波动的方法，在系统电量平衡波动时则根据具体工况快速实现有功功率的调节。

3) 负荷模块。负荷主要包括电动机负荷和其他负荷，总计算容量32 MW。同时，搭建有柴油发电机模块，在断电情况下维持重要负荷供电不间断。

低频减载是一种最常见又最有效的用来防止电网出现频率崩溃的安全控制措施，即当电力系统因发电和用电负荷的需求之间出现缺额而引起频率下降时，按照事先整定的动作频率值，依次将系统中预先安排好的一部分次要负荷切除，从而使电网有功功率重新趋于平衡，频率得到回升。迄今为止，这是防止电网因频率下降导致频率崩溃事故的最主要的一种安全措施。因此研究的安全稳定控制措施将主要考虑低频减载^[4]。

文献[5]基于homer软件，搭建含太阳能电池、风电、微型燃气轮机、柴油发电机和储能等多种分布式电源的微网系统。对太阳能电池及蓄电池容量变化、分布式能源成本变化和并网运行等方面进行深入探讨和敏感性分析。

稳态运行工况仿真分析

1. 光热机组储热发电运行仿真

发电机组惯性时间常数取 $H=1.29$ s；有功功率向上爬坡速率3%/min；一次调频最大向上可调功率约10% P_n ，滞后时间约50 ms。如图2所示，在12 s时投入4 MW的有功负荷，光热机组快速跟踪并增加响应的有功出力，系统频率下降约0.02 Hz；20 s时投入5 MW的有功负荷，光热机组增加有功出力响应，但受一次调频上限及出力延时的影响，系统频率最大下降约0.1 Hz，随后逐步恢复正常范围；

在35 s时逐步切出约9 MW负荷，光热机组出力逐步降低，在一次调频及二次调频共同作用下，系统频率恢复正常。

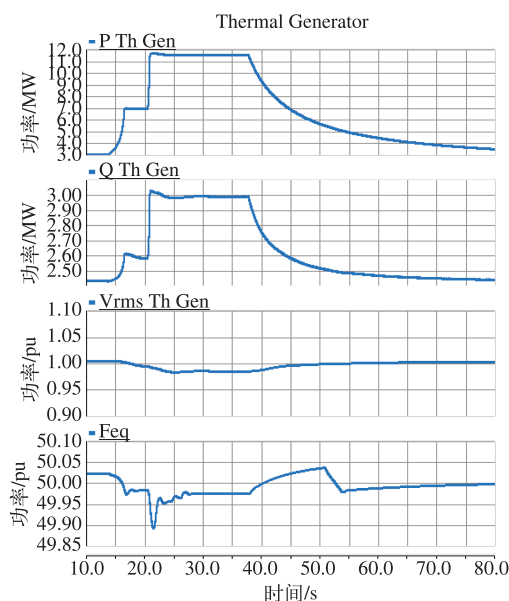


图2 光热机组有功出力特性

2. 光伏最优发电功率运行

光伏场站有功出力主要受到光照强度和温度等因素的影响。主要模拟光照强度的增加及突降，光伏场站有功出力的响应情况。如图3所示，在1 s时，光照强度由100 W/m²增加至500 W/m²，对应于光伏出力由5 MW上升至约25 MW；在3 s时，光照强度突变至50 W/m²，对应于光伏出力突降至约1 MW。

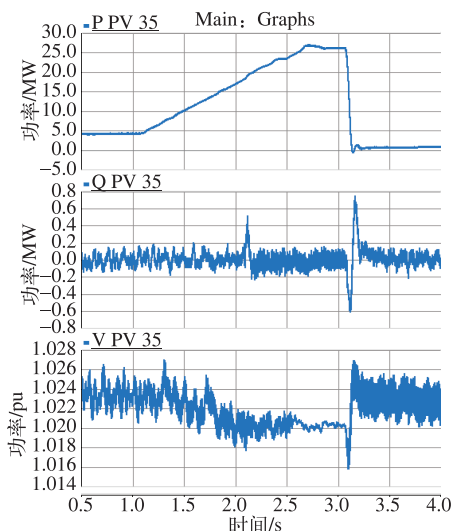


图3 光伏场站光照强度波动时发电功率特性

3. 负荷运行特性

本项目中,用电负荷主要是电动机类负荷,且常年稳定于32 MW。10 kV高压及380 V低压大容量电动机组都配置有变频启动或软启动装置。

化学储能通过充电和放电,实现对光伏功率波动的平抑及支撑系统电力电量平衡等作用。化学储能的主要性能参数,包括:荷电状态(State of Charge, SOC)、充放电模式和功率支撑速率等。

如图4所示,1~4 s时段,模拟负荷逐步投入;4.5 s模拟突然增加2 MW负荷。

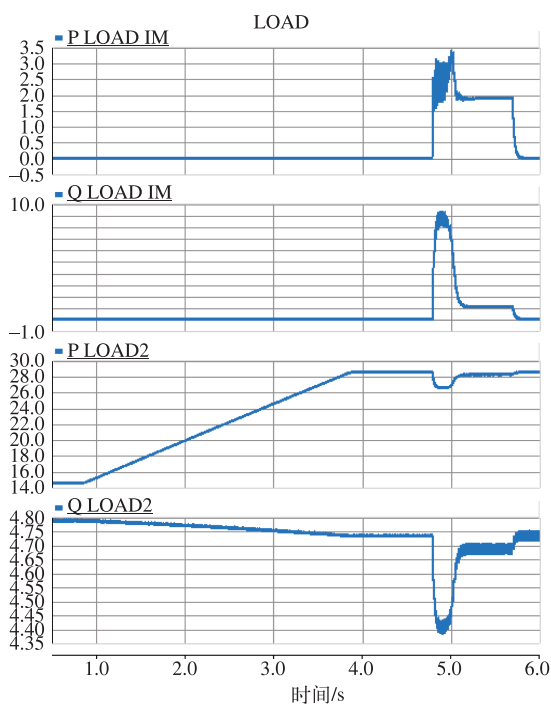


图4 负荷升降特性

(1) 日间运行工况

光伏和化学储能主要在日间运行。在满足孤网稳定运行的基础上,汽轮机尽量降低负荷运行,同时供应全部蒸汽负荷。扣除光热出力后,其余电力由光伏和化学储能提供。模拟光照强度突降的极限情况下,光热机组惯量、一次调频及化学储能对有功功率的支撑工况。光伏发电功率小幅度波动,设置光照强度的突然降低,模拟光伏场站发电功率的小幅度损失。

日间光伏小发,发电功率约14 MW,其他负荷功率由光热机组承担。如图5所示,在系统运行至约1 s时,模拟光照强度突降,光伏场站发电功率下降约20% P_n (约7 MW)。设置1~4 s期间,化学储能

不参与有功功率调节,由光热机组补充功率缺额;由于光热机组响应速度较慢,导致系统频率波动下降最大约0.35 Hz;设置4~10 s期间,光照强度恢复,光伏场站发电功率恢复至原来水平;10 s时,再次设置相同的光照强度突降,化学储能与光热机组均参与有功功率调节;由于化学储能响应速度较快,为系统提供一定的功率支撑,系统频率波动下降最大约0.2 Hz。可见,化学储能支撑光伏系统的小功率波动工况效果明显。

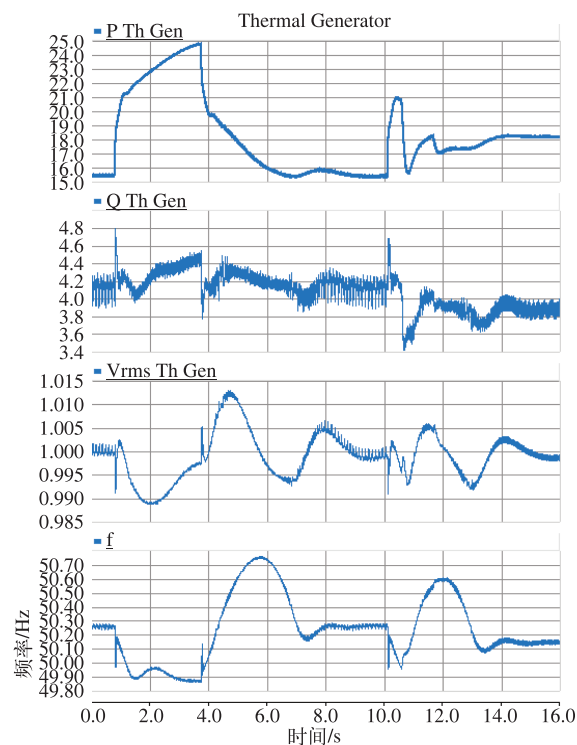


图5 化学储能抑制光伏功率波动特性

光伏发电功率大幅度波动,设置光照强度突然降低,模拟光伏场站发电功率大幅度损失。按照日间光伏大发,发电功率约25 MW,其他负荷功率由光热机组承担。如图6所示,若化学储能不参与功率调节,仅由光热机组支撑有功缺额,系统频率最大降低约1.2 Hz;系统频率稳定在约49.6 Hz,随后,由二次调频将系统频率调整至正常范围。

若化学储能与光热机组共同支撑有功缺额。如图7所示,在0.2 s时,设置光照强度突降,导致光伏场站有功功率下降、系统频率降低;此时,只有光热机组的惯量支撑系统频率,暂态频率降至49.2 Hz左右;随后,化学储能快速支撑约20 MW有功功率缺额,伴随2.5 s时刻切除约4 MW有功负荷,随后系

统频率回稳并将在二次调频作用下逐步恢复至正常范围。

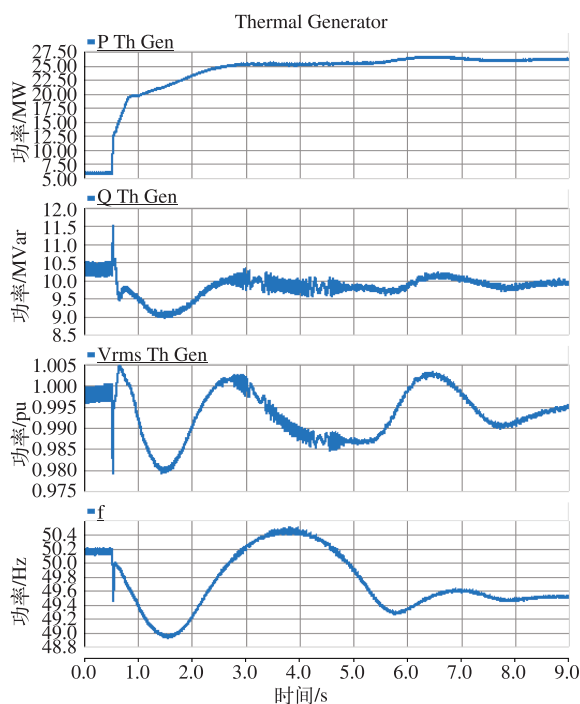


图6 化学储能不参与功率支撑

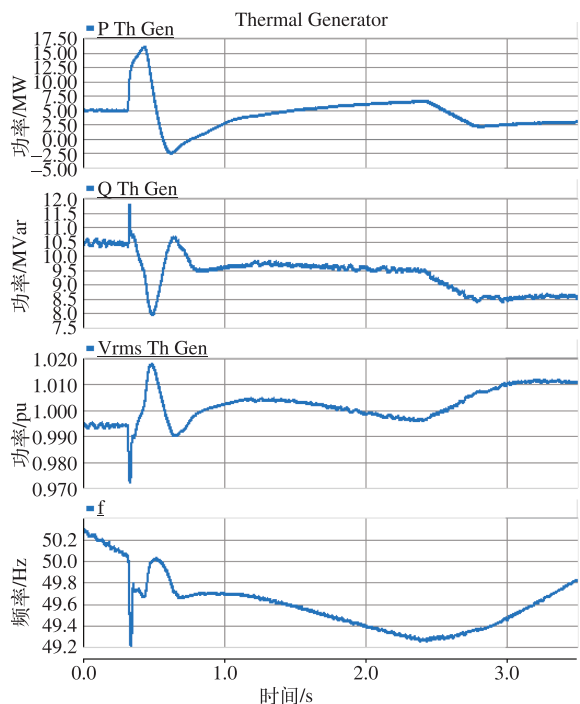


图7 化学储能参与20 MW功率支撑

如图8所示, 相同的工况下, 化学储能支撑约12 MW有功功率缺额, 由于系统有功功率缺额较大, 频率逐步降低超过1.5 Hz, 随着两轮次切除约

10 MW负荷, 系统频率逐步向正常范围恢复。

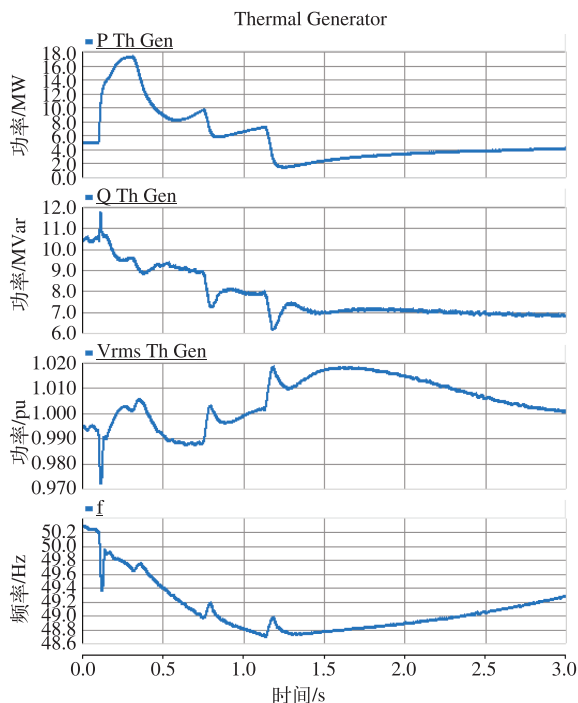


图8 化学储能参与12 MW功率支撑

综上分析可见, 化学储能可快速释放有功功率, 若能完全弥补功率缺额或与光热机组共同补充功率, 则系统频率可维持稳定; 若化学储能SOC状态低或功率支撑幅值低于系统功率缺额时, 导致储能功率裕量不能够维持微电网功率平衡, 仍需要将部分负荷分批次切除, 以保证系统供电稳定性。相同的能量存储条件下, 化学储能的放电范围越深, 系统频率稳定性越好。

本项目中, 储能总存储能量为30 MW·h的情况下, 30 MW/30 MW·h相比较于15 MW/30 MW·h的配置方案: 放电幅值方面, 前者放电深度更高, 系统频率稳定性更好; 放电持续时间方面, 按照光热机组有功调节速度 $3\%P_n/\text{min}$ 计算, 机组约15 min后可实现功率增量约20 MW, 两种电化学储能配置方案都满足要求。

(2) 夜间运行工况

光热电站主要满足夜间供电需求和供热需求, 夜间供电功率32.2 MW, 供应全部蒸汽负荷。

如图9所示, 夜间模式下, 光伏不输出有功功率, 光热机组承担全部工厂的32 MW负荷; 较小幅值的有功及无功功率波动, 均可由光热机组的调度、励磁系统响应, 维持系统电压频率稳定。

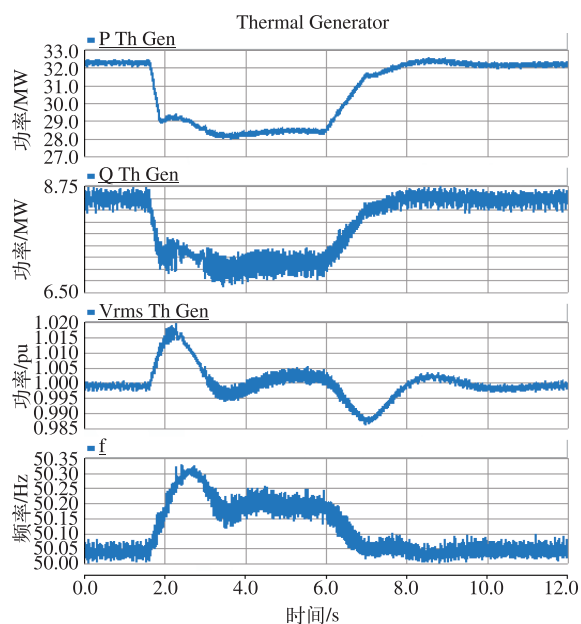


图9 光热机组特性曲线

结束语

基于光热机组额定容量40 MW、光伏场站额定容量35 MWp及化学储能容量30 MW·h，并入35 kV电压等级的孤网运行方案。当光照强度大幅度波动，引起系统出现较大功率缺额时，存在导致系统失稳的风险。此时，需要化学储能能快速响应并配合

光热机组的调频能力，维持系统稳定。光热机组的惯量可瞬间响应系统的功率缺额，决定了系统暂态频率的下限；一次调频也可支撑至少约10%额定容量的有功，但其响应速度较慢，调节周期较长。EA

(收稿日期：2024-10-15)

参考文献

- [1] 吴金星. 源网荷储智能化调度控制系统的应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2022(12): 155-156.
- [2] 王成龙, 王振华, 王淼, 等. 电池储能技术在孤网系统中的应用与分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022, 4(12): 1-5.
- [3] 叶鹏, 胡耀宁, 孙铭徽. 风储孤网系统的建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2236-2244.
- [4] 吴桐, 刘畅, 王刚, 等. 孤网运行安全稳定控制策略研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2015, 11(1): 66-69.
- [5] 朱兰, 杨秀. 含多种分布式电源的微网系统的设计与仿真分析[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1604-1607.

