

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.05.024

## 考虑光热电站接入的电力系统暂态功角稳定性分析

苏志军<sup>1</sup>, 夏世威<sup>1</sup>, 李庚银<sup>1</sup>, 孙冠群<sup>2</sup>, 蔡德福<sup>2</sup>, 张良一<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 武汉 430077)

**摘要:** 光热发电兼具调峰电源和储能的双重功能, 可为新能源电力系统提供转动惯量及阻尼支撑, 但其对电力系统稳定性的影响尚不明确。针对光热并网对系统暂态稳定性的影响及其机理问题, 首先基于容量加权法建立了光热电站等值模型, 然后根据光热电站的低惯量特性, 利用扩展等面积法则 (extended equal-area criterion, EEAC) 分析了惯量降低对系统暂态功角稳定性的影响。研究表明, 在单机无穷大系统中, 光热电站等容量替代火电机组会导致系统惯量降低, 系统暂态功角稳定性减弱。最后基于某区域电网, 仿真分析了光热规模化并网对系统暂态稳定性的影响。

**关键词:** 光热发电; 新能源电力系统; 扩展等面积法则; 暂态功角稳定性; 惯量

### Transient Power Angle Stability Analysis of Power System Considering the Access of Concentrated Solar Power Plant

SU Zhijun<sup>1</sup>, XIA Shiwei<sup>1</sup>, LI Gengyin<sup>1</sup>, SUN Guanqun<sup>2</sup>, CAI Defu<sup>2</sup>, ZHANG Liangyi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Concentrated solar power (CSP) generation exhibits a dual functionality of peak load regulation and energy storage, offering rotational inertia and damping support to the renewable energy power system. However, its influence on the stability of power system remains unclear. As for the influence and its mechanism of integration of CSP into power system on the transient stability of system, an equivalent model of CSP plants based on the capacity-weighting method is set up firstly. Then, considering the low inertia characteristics of CSP plants, the extended equal-area criterion (EEAC) is used to analyze the influence of inertia reduction on the transient power angle stability of the system. The research results show that in a single-machine infinite bus system, the substitution of thermal power units with CSP plants at equivalent capacity results in a reduction of system inertia and a weakening of transient power angle stability. Finally, the influence of large-scale integration of CSP on transient stability of power system is simulated and analyzed on the basis of a regional power grid.

**Key words:** concentrated solar power (CSP); renewable energy power system; extended equal-area criterion; transient angle stability; inertia

## 0 引言

随着“碳达峰碳中和”目标的提出, 风电、光伏等新能源迅速发展, 在电力系统中占比越来越高, 甚至出现了100%新能源电力系统。但随着新能源

占比增加, 风电、光伏固有的低惯量、低阻尼特性使得电力系统惯量、阻尼急剧下降, 给电力系统安全稳定运行带来新的问题。而光热发电不仅具备与火力发电相似的运行特性, 能够为新能源电力系统提供惯量、阻尼支撑, 而且自身具有储能功能、可控

收稿日期: 2024-11-30; 修回日期: 2025-02-05

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5100-202199536A-0-5-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5100-202199536A-0-5-ZN).

强<sup>[1]</sup>,可缓解风电、光伏造成的波动性<sup>[2-4]</sup>。但光热并网对电力系统稳定性的影响机理尚不明确,亟需进行光热并网对电力系统暂态稳定性的影响分析。

目前针对光热发电动态特性及光热并网对系统稳定性的影响已有部分研究,文[5-8]建立了包括集热系统、储能系统、蒸汽发生系统和发电系统的光热电站动态模型,详细表征了光热电站内部的动态特性,但并未考虑光热电站与电力系统间的交互作用。文[9]建立了槽式光热电站的动态及降阶模型,并分析了光热电站在高比例新能源电力系统中的支撑作用,认为光热电站接入可使新能源电力系统保持较高的惯量水平。文[10-13]分别建立了光热发电与光伏、风电和火电的联合发电系统,利用光热发电的灵活调节能力实现多能互补运行,促进新能源消纳,提高系统调峰能力。文[14-16]将光热电站考虑为小容量同步机组集群,阐明机组数量是影响系统小干扰稳定性的关键因素,并且区别于传统电力系统中低频振荡由同步机组的机电环节引起,光热电站并网引起的振荡是由励磁环节导致的。文[17]基于某省实际电网,研究发现在风电、光伏等新能源并网容量较大的区域接入光热电站,光热电站出力增加易导致系统电压失稳,但特定的新能源出力组合能够提升电网性能。现有研究主要针对光热电站的长时间尺度动态特性,侧重于光热电站内部性能或含光热发电的多能互补分析,而光热并网对电力系统暂态功角稳定性的影响尚研究不足,亟待进一步探索。

现有新能源场站聚合建模方法主要有单机等值法和多机等值法<sup>[18]</sup>。单机等值法将所有机组聚合为一台等值机组,机组参数通过容量加权法或参数辨识法计算。多机等值法则首先根据机端电压、有功输出等指标对各机组进行分群聚类,再对各机群进行单机等值。与单机等值法相比,多机等值法模型精度更高,但分群结果依赖于分群指标、算法的选取及获取数据的准确度。目前光热电站等值模型主要针对电力系统运行模拟<sup>[19]</sup>和振荡稳定性分析<sup>[16]</sup>,用于暂态稳定分析的光热电站等值模型较少。而光热电站与集中式光伏电站、风电场类似,单机容量较小且通常以集中接入方式并网<sup>[14]</sup>,因此可参考现有新能源场站的聚合建模方法建立光热电站的动态聚合模型。

文中根据光热发电特点,建立了用于暂态稳定分析的光热电站等值模型,并基于EEAC分析了光热电站的低惯量特性对系统暂态功角稳定性影响,最后通过Pspas软件搭建某区域电网进行了含光热电站的电力系统稳定性仿真分析。

## 1 光热电站等值模型

光热电站主要包括聚光集热系统、储热系统、蒸汽发生系统和汽轮发电系统等。从工作原理分析,光热电站的蒸汽发生系统和汽轮发电系统与火电机组相同<sup>[20]</sup>,主要区别在于加热水工质的方式不同。从结构分析,光热机组转子质量轻,外径小,整体结构更加紧凑,单位容量的光热机组惯性时间常数小于火电机组的对应值<sup>[21]</sup>,符合光热机组快速启动<sup>[22]</sup>、频繁启停的特点,具体参数差异<sup>[23]</sup>见图1,图1基准值为 $S_B=100\text{ MW}$ ,  $U_B=13.8\text{ kV}$ ,后文所有标么值均采用此基准值。

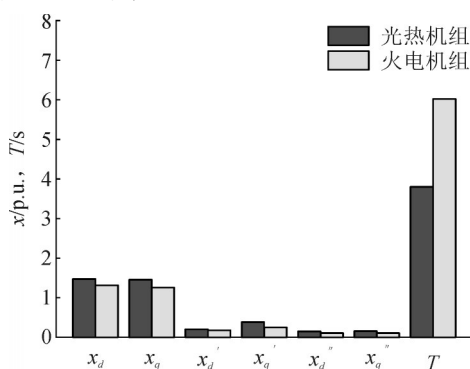


图1 100 MW光热机组与火电机组参数对比

Fig. 1 Comparison of parameters between 100 MW CSP units and thermal power units

由于聚光集热系统等与汽轮发电系统动态特性时间尺度差异大,在研究光热并网的电力系统暂态稳定问题时,光热发电与常规火电本质上均为同步发电机组,无需建立新的光热机组暂态模型<sup>[20]</sup>。而目前技术限制,光热发电单机容量较小,国内在建/建成项目单机容量多为50 MW或100 MW,因此分析电力系统暂态功角稳定性时,光热电站为低惯量的同步机组。

### 1.1 光热电站机组等值

由上述分析可知,光热机组与风电机组类似,因此参考风电场的机组等值方法<sup>[24]</sup>建立光热电站等值模型。考虑到光热电站内部各光热机组距离较近,动态特性相似,因此可认为光热电站内各光热机组为同一相关机群,则光热电站等值模型为

$$\begin{cases} S_{eq} = \sum_{\forall i \in C} S_i \\ P_{eq} = \sum_{\forall i \in C} P_i \\ Q_{eq} = \sum_{\forall i \in C} Q_i \\ X_{eq} = \frac{\sum_{\forall i \in C} S_i X_i}{S_{eq}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中:  $C$  为光热机群;  $S_{eq}$ 、 $P_{eq}$ 、 $Q_{eq}$  为光热电站等值额定容量、有功功率和无功功率;  $S_i$ 、 $P_i$ 、 $Q_i$  为第  $i$  台光热机组的额定容量、有功功率和无功功率;  $X_{eq}$ 、 $X_i$  为光热电站等值参数和第  $i$  台光热机组参数,可表示惯性时间常数  $T$ , 阻尼系数  $D$ ,  $dq$  轴同步电抗  $X_d$ 、 $X_q$ , 暂态电抗  $X'_d$ 、 $X'_q$  和次暂态电抗  $X''_d$ 、 $X''_q$  等,其中  $X_{eq}$  是以  $S_{eq}$  为基准的标么值,而  $X_i$  是以  $S_i$  为基准的标么值。若光热机组采用相同类型的励磁调节系统和电力系统稳定器,则光热电站等值模型控制参数同样可根据式进行计算。

## 1.2 光热电站汇集网络等值

光热机组拓扑连接关系对光热电站机组等值参数无影响,文中以并联型拓扑结构为例进行分析见图2。

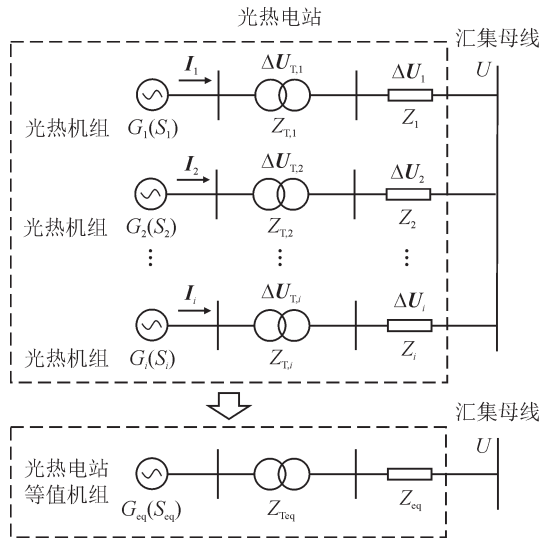


图2 光热电站等值模型

Fig. 2 Equivalent model of CSP plant

光热电站内部汇集线路和变压器均会产生功率损耗,可根据等值前后功率损耗不变的原则进行汇集网络的等值计算。根据光热机组注入电流  $I_i$ 、汇集线路阻抗  $Z_i$ 、变压器阻抗  $Z_{T,i}$ ,计算变压器高压侧与汇集母线之间的电压差  $\Delta U_i$  以及变压器上的电压差  $\Delta U_{T,i}$ ,进而得到汇集网络中各线路功率损耗  $\Delta S_i$  和各变压器功率损耗  $\Delta S_{T,i}$

$$\begin{cases} \Delta S_i = \Delta U_i I_i^* \\ \Delta S_{T,i} = \Delta U_{T,i} I_i^* \end{cases} \quad (2)$$

根据等值前后功率损耗不变原则,计算光热电站内部汇集线路等值阻抗  $Z_{eq}$  和变压器等值阻抗  $Z_{Teq}$

$$\begin{cases} Z_{eq} = \frac{\sum_{i \in C} \Delta S_i}{\left[ \frac{\sum_{i \in C} S_i - \sum_{i \in C} \Delta S_i - \sum_{i \in C} \Delta S_{T,i}}{U} \right]^2} \\ Z_{Teq} = \frac{\sum_{i \in C} \Delta S_{T,i}}{\left[ \frac{\sum_{i \in C} S_i - \sum_{i \in C} \Delta S_i - \sum_{i \in C} \Delta S_{T,i}}{U} \right]^2} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $U$  为汇集母线电压。

## 2 基于EEAC的系统暂态功角稳定性分析

上节建立了含多台光热单机的光热电站等值模型。由上述分析可知,光热电站与同容量火电机组相比单位额定容量的惯性时间常数更小。而惯量是影响电力系统暂态稳定性的关键因素之一,因此光热电站对系统功角稳定性影响分析可从同步机组惯量降低对系统功角稳定性的影响分析角度开展。本节利用EEAC分析光热电站并网低惯量特性对系统暂态功角稳定性影响机理。

EEAC理论首先根据受扰程度将机组分为临界机群  $S$  和剩余机群  $A$ 。其次通过互补群惯量中心—相对运动变换将多机轨迹映射到聚合单机的扩展相平面上,形成单机映象系统的  $P$ - $\delta$  轨迹。最后选取不同分群方式下映象系统稳定裕度的最小值对系统稳定性进行量化分析<sup>[25]</sup>。临界机组为

$$\begin{cases} T_s \frac{d\delta_s}{dt} = \sum_{i \in s} (P_{mi} - P_{ei}) \\ T_s = \sum_{i \in s} T_i \\ \delta_s = \sum_{i \in s} T_i \delta_i / T_s \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中:  $T_s$ 、 $\delta_s$  为临界机组的惯性时间常数、功角;  $T_i$ 、 $\delta_i$ 、 $P_{mi}$ 、 $P_{ei}$  为机组  $i$  的惯性时间常数、功角、机械功率和电磁功率;  $s$  为临界机群集合。

剩余机组为

$$\begin{cases} T_a \frac{d\delta_a}{dt} = \sum_{i \in a} (P_{mi} - P_{ei}) \\ T_a = \sum_{i \in a} T_i \\ \delta_a = \sum_{i \in a} T_i \delta_i / T_a \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:  $T_a$ 、 $\delta_a$  为剩余机组的惯性时间常数、功角;  $a$  为剩余机群集合。单机映象系统为

$$\begin{aligned} \frac{T_s T_a}{T_s + T_a} \frac{d\delta_{sa}}{dt} &= \frac{T_a}{T_s + T_a} \sum_{i \in s} (P_{mi} - P_{ei}) - \\ &\quad \frac{T_s}{T_s + T_a} \sum_{j \in a} (P_{mj} - P_{ej}) \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.1 单机无穷大系统

稳定裕度  $\eta$  为

$$\eta = -\int_{\delta_0}^{\delta_d} (P_m - P_e) d\delta = A_{dec} - A_{acc} \quad (7)$$

式(7)中:  $P_m$ 、 $P_e$  为同步机的机械功率、电磁功率; 减速面积  $A_{dec} = -\int_{\delta_c}^{\delta_d} (P_m - P_e) d\delta$ , 加速面积  $A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta$ ,  $\delta_c$  为故障清除时刻的功角;  $\delta_d$  为不稳定平衡点的功角。

单机无穷大系统中, 光热电站采用二阶经典同步机模型, 见图3、4, 假设双回线  $L_2$  近光热电站侧首端发生三相短路故障, 故障持续  $\Delta t$  后消失, 则故障期间  $P_e \approx 0$ , 故障清除时刻功角  $\delta_c$  及加速面积  $A_{acc}$  为

$$\begin{cases} \delta_c = \delta_0 + \frac{P_m \Delta t^2}{2T} \\ A_{acc} = \frac{P_m^2 \Delta t^2}{2T} \end{cases} \quad (8)$$

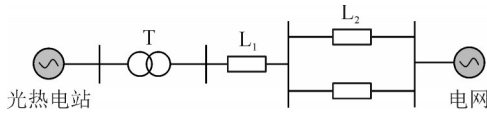


图3 单机无穷大系统

Fig. 3 Single-machine infinite bus system

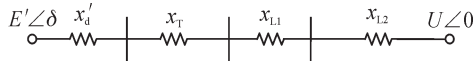


图4 单机无穷大系统等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of single-machine infinite bus system

故障清除后不稳定平衡点功角  $\delta_d$  及减速面积  $A_{dec}$  为

$$\begin{cases} \delta_d = \arcsin\left(\frac{P_m x}{E' U}\right) \\ A_{dec} = -\int_{\delta_c}^{\delta_d} (P_m - P_e) d\delta \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中:  $x = x'_d + x_T + x_{L1} + x_{L2}$ ,  $x'_d$  为同步机直轴暂态电抗,  $x_T$  为变压器电抗,  $x_{L1}$  为线路  $L_1$  电抗,  $x_{L2}$  为双回线  $L_2$  电抗;  $E'$  为同步机暂态电势;  $U_0$  为无穷大系统母线电压。由上述分析可知, 光热电站等容量替代火电机组可简化等效为同步机组惯量降低, 即  $T$  减小。因此忽略  $x'_d$  的影响, 保持  $x_T$ 、 $x_{L1}$  不变, 由式(8)、(9)可知,  $T$  减小, 则  $\delta_c$  增大, 加速面积  $A_{acc}$  增大,  $\delta_d$  不变, 减速面积  $A_{dec}$  减小, 稳定裕度  $\eta$  减小, 系统稳定性减弱, 见图5。

## 2.2 双机系统

以双机系统正向首摆为例, 见图6, 研究受端为非无穷大系统时机组惯量减小对系统暂态功角稳定性的影响, 则映象系统可表示为

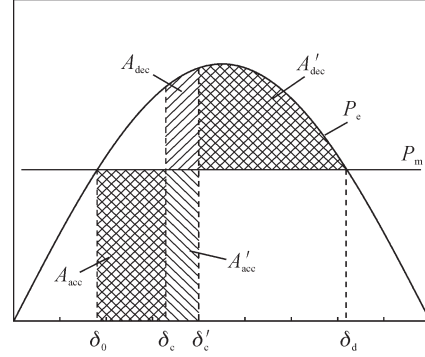


图5 惯量减小时稳定裕度变化

Fig. 5 Variations in stability margin with reduced inertia

$$\begin{cases} \frac{T_s T_a}{T_s + T_a} \frac{d\delta_{sa}}{dt} = \frac{T_a (P_{ms} - P_{es})}{T_s + T_a} - \frac{T_s (P_{ma} - P_{ea})}{T_s + T_a} = P_{un} \\ \ddot{\delta}_{sa} = \ddot{\delta}_s - \ddot{\delta}_a = \frac{P_{ms} - P_{es}}{T_s} - \frac{P_{ma} - P_{ea}}{T_a} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中:  $P_{ms}$ 、 $P_{es}$  为临界机组  $G_s$  的机械功率、电磁功率;  $P_{ma}$ 、 $P_{ea}$  为剩余机组  $G_a$  的机械功率、电磁功率。故障清除时刻功角  $\delta_c$  为

$$\delta_c = \delta_0 + \int_0^{t_c} \int_0^{t_c} \ddot{\delta}_{sa} dt dt \quad (11)$$

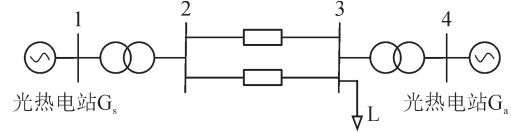


图6 双机系统

Fig. 6 Two-machine system

光热电站采用二阶经典同步机模型, 因此  $P_{ms}$ 、 $P_{ma}$  不变, 而  $P_{es}$ 、 $P_{ea}$  与机组相对功角  $\delta_{sa}$  有关。若故障期间 ( $\delta_0 < \delta_{sa} < \delta_c$ ) 及故障清除后达到不稳定平衡点前 ( $\delta_c < \delta_{sa} < \delta_d$ ),  $\ddot{\delta}_s$ 、 $\ddot{\delta}_a$  符号变化, 则  $T_s$ 、 $T_a$  减小对  $\delta_c$ 、 $P_{un}$  的影响显然难以定性分析。因此仅考虑下述场景: 故障期间、故障清除后达到不稳定平衡点前,  $\ddot{\delta}_s$ 、 $\ddot{\delta}_a$  符号不变, 故障期间  $\ddot{\delta}_{sa} > 0$ 。

### 2.2.1 惯量减小对故障期间 $\delta_c$ 、 $P_{un}$ 、 $A_{acc}$ 的影响

1) 当  $\ddot{\delta}_{sa} > 0$ ,  $\ddot{\delta}_s > 0$ ,  $\ddot{\delta}_a > 0$  时, 由式(10)、(11)可知,  $T_s$  减小, 则  $\frac{P_{ms} - P_{es}}{T_s}$  增大,  $\frac{P_{ma} - P_{ea}}{T_a}$  不变,  $\ddot{\delta}_{sa}$  增大,  $\delta_c$  增大,  $\frac{T_a (P_{ms} - P_{es})}{T_s + T_a}$  增大,  $\frac{T_s (P_{ma} - P_{ea})}{T_s + T_a}$  减小,  $P_{un}$  增大,  $A_{acc}$  增大。同理可得,  $T_a$  减小, 则  $\delta_c$  减小,  $P_{un}$  减小,  $A_{acc}$  减小。

2) 当  $\ddot{\delta}_{sa} > 0$ ,  $\ddot{\delta}_s > 0$ ,  $\ddot{\delta}_a < 0$  时,  $T_a$ 、 $T_s$  减小对  $\delta_c$ 、 $P_{un}$ 、 $A_{acc}$  的影响不确定。

### 2.2.2 惯量减小对故障清除后 $\delta_d$ 、 $P_{un}$ 、 $A_{dec}$ 的影响

$P_{un}$  与  $\delta_d$  变化趋势相反,  $P_{un}$  增大, 则  $\delta_d$  减小,

$A_{dec}$  减小,反之亦然,见图7。

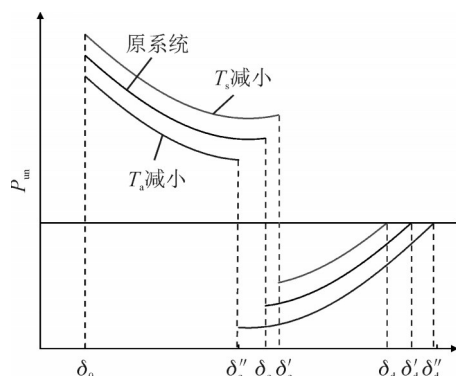


图7 惯量减小时 $P_{un}$ 变化趋势

Fig. 7 Trend of  $P_{un}$  with reduced inertia

1)当 $\ddot{\delta}_s > 0$ ,  $\ddot{\delta}_a > 0$ 时,由式(10)可知, $T_s$ 减小,则 $\frac{T_a(P_{ms} - P_{es})}{T_s + T_a}$ 增大, $\frac{T_s(P_{ma} - P_{ea})}{T_s + T_a}$ 减小, $P_{un}$ 增大, $\delta_d$ 减小, $A_{dec}$ 减小;同理可得, $T_a$ 减小,则 $P_{un}$ 减小, $\delta_d$ 增大, $A_{dec}$ 增大。

2)当 $\ddot{\delta}_s > 0$ ,  $\ddot{\delta}_a < 0$ 时, $T_a$ 、 $T_s$ 减小对 $\delta_d$ 、 $P_{un}$ 、 $A_{dec}$ 的影响不确定。

3)当 $\ddot{\delta}_s < 0$ ,  $\ddot{\delta}_a > 0$ 时, $T_a$ 、 $T_s$ 减小对 $\delta_d$ 、 $P_{un}$ 、 $A_{dec}$ 的影响不确定。

4)当 $\ddot{\delta}_s < 0$ ,  $\ddot{\delta}_a < 0$ 时, $T_s$ 减小,则 $P_{un}$ 减小, $\delta_d$ 增

大, $A_{dec}$ 增大; $T_a$ 减小,则 $P_{un}$ 增大, $\delta_d$ 减小, $A_{dec}$ 减小。

由上述分析可知,针对系统正向首摆,若满足 $\delta_0 < \delta_{sa} < \delta_c$ 时, $\ddot{\delta}_{sa} > 0$ ;  $\delta_0 < \delta_{sa} < \delta_d$ 时, $\ddot{\delta}_s > 0$ ,  $\ddot{\delta}_a > 0$ 的条件, $T_s$ 减小,则 $A_{acc}$ 增大, $A_{dec}$ 减小, $\eta$ 减小,不利于系统稳定; $T_a$ 减小,则 $A_{acc}$ 减小, $A_{dec}$ 增大, $\eta$ 增大,有利于系统稳定,见图7。若不满足上述条件,则机组惯量减小对系统暂态功角稳定性的影响难以定性确定,需通过量化计算判断。

### 3 算例仿真

#### 3.1 光热电站等值模型验证

基于Psasp软件搭建某500 kV交直流混联系统验证光热电站等值模型的准确性,该系统主框架见图8,包含送端和受端区域,送端电网经交直流线路将电能送往受端电网,负荷集中在受端区域。假设光热电站由6台100 MW光热机组组成,参数见表1。将光热电站在 $bus_8$ 母线处接入,对全阶系统(6台光热机组采用独立的动态模型)和等值系统(6台光热机组采用聚合等值的光热电站模型)进行仿真。故障设置为0 s时 $bus_3$ - $bus_6$ 联络线50%处发生三相短路故障,故障持续0.05 s后消失。

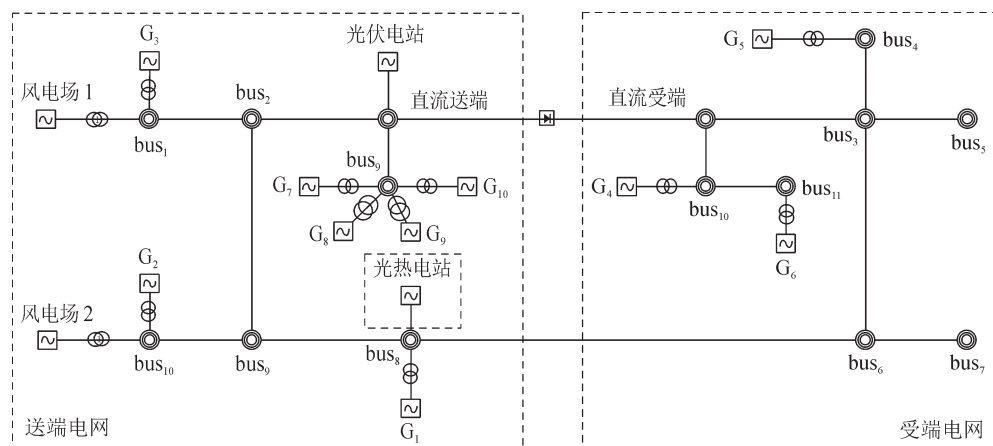


图8 500 kV交直流混联系统

Fig. 8 500 kV AC/DC hybrid power system

等值系统和全阶系统中火电机组 $G_7$ 和 $G_5$ 、 $G_6$ 和 $G_5$ 的相对功角曲线基本重合,光热电站输出有功功率和无功功率曲线吻合程度较好,光热电站等值模型精度较高,能够较为准确地描述光热机群的动态特性,见图9、10。

#### 3.2 单机无穷大系统

假设图3所示系统中同步机由10台额定容量为100 MW的火电机组成,增大光热电站并网功率,即增加光热机组数量,仿真分析当受端为无穷大系统

时,光热电站等容量替代火电机对系统暂态功角稳定性的影响。100 MW火电机参数参考IEEE9节点系统,光热机组参数见表1。故障设置为双回线近同步机侧首端发生三相短路故障,故障持续0.2 s后消失。

光热电站等容量替代火电机见图11,A点表示光热电站并网功率为0 MW,火电机并网功率为1 000 MW,对应无光热机组替代火电机场景;B点表示光热电站并网功率为1 000 MW,火电机并网功率为0 MW,对应光热机组100%替代火

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| 参数                  | 光热机组(单机 100 MW) | 光热电站(含 6 台 100 MW 光热机组) | 600 MW 火电机组 |
|---------------------|-----------------|-------------------------|-------------|
| $S/\text{MVA}$      | 117.6           | 705.9                   | 667.0       |
| $P/\text{MW}$       | 100.0           | 600.0                   | 600.0       |
| $X_d/\text{p.u.}$   | 1.474           | 0.246                   | 0.604       |
| $X'_d/\text{p.u.}$  | 0.200           | 0.033                   | 0.089       |
| $X''_d/\text{p.u.}$ | 0.148           | 0.024                   | 0.069       |
| $X_q/\text{p.u.}$   | 1.457           | 0.243                   | 0.273       |
| $X'_q/\text{p.u.}$  | 0.385           | 0.064                   | 0.135       |
| $X''_q/\text{p.u.}$ | 0.157           | 0.026                   | 0.068       |
| $T/\text{s}$        | 3.8             | 22.8                    | 100.0       |

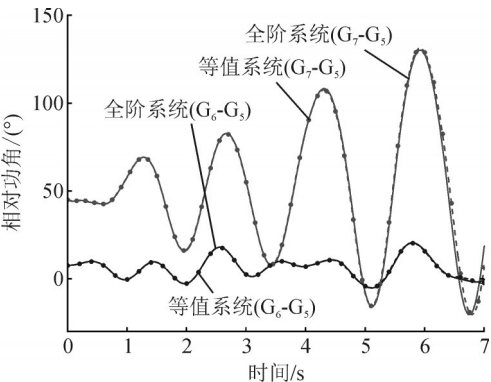


图9 机组相对功角

Fig. 9 Relative power angle of generators

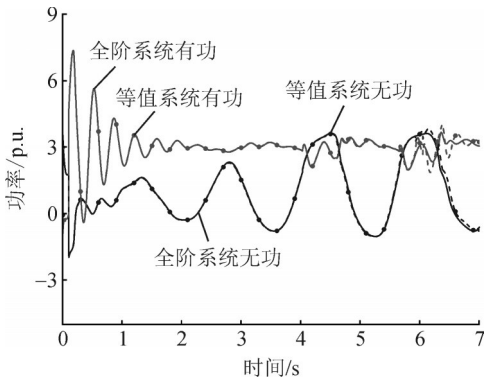


图10 光热电站输出功率

Fig. 10 Output power of CSP plant

电机组的场景。基于 A、B 点以及图 11 的其他数据点(对应光热机组不同比例替代火电机组)的稳定裕度和系统惯量结果对比,可见:随光热电站替代功率增加,系统惯量降低,稳定裕度减小,暂态功角稳定性减弱。由于光热电站等容量替代火电机组会导致系统惯量降低,基于 EEAC 理论分析可得系统加速面积增大,减速面积减小,稳定裕度减小,系统暂态功角稳定性减弱。

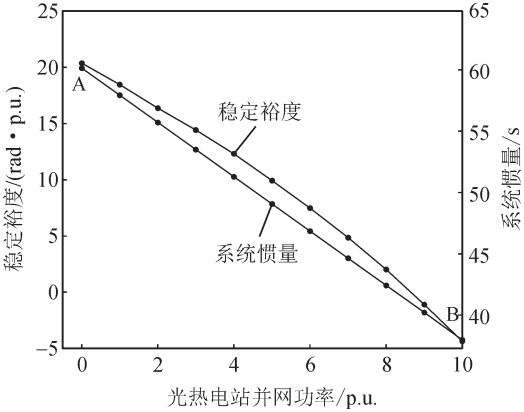


图11 光热电站等容量替代火电机组

Fig. 11 CSP plant replacing the same capacity of thermal power units

3.3 双机系统

以图 6 所示的双机系统为例,仿真分析受端为非无穷大系统时机组惯量降低对系统暂态功角稳定性的影响。机组  $G_s$ 、 $G_a$  采用表 1 中火电机组参数,负荷为  $P_L=1\ 200\ \text{MW}$ 。故障设置为 0 s 时 2-3 联络线末端处发生三相短路故障,故障持续 0.5 s 后消失。

当  $\delta_0 < \delta_{sa} < \delta_c$  时,  $\ddot{\delta}_a > 0$ ,  $\ddot{\delta}_s > 0$ ,  $\ddot{\delta}_{sa} > 0$ ; 当  $\delta_c < \delta_{sa} < \delta_d$  时,  $\ddot{\delta}_a > 0$ , 而  $\ddot{\delta}_s$  先小于零,后大于零,见图 12。该场景下机组惯量降低对系统稳定裕度的影响难以定性分析,需进行定量计算。机组惯量降低,系统稳定裕度均呈现出先增大后减小的变化趋势,这是由于惯量降低改变了机组功角超前、滞后关系,见图 13。在不改变机组功角超前、滞后关系时,临界机组惯量减小,稳定裕度减小,不利于系统暂态稳定性;剩余机组惯量减小,稳定裕度增大,有利于系统暂态稳定性。

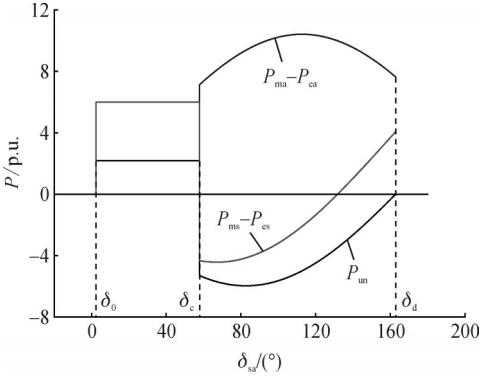


图12  $T_s < T_a$  时,系统  $P$ - $\delta$  曲线

Fig. 12  $P$ - $\delta$  curve of the system when  $T_s < T_a$

3.4 区域电网

基于图 8 所示的区域电网,仿真分析光热电站

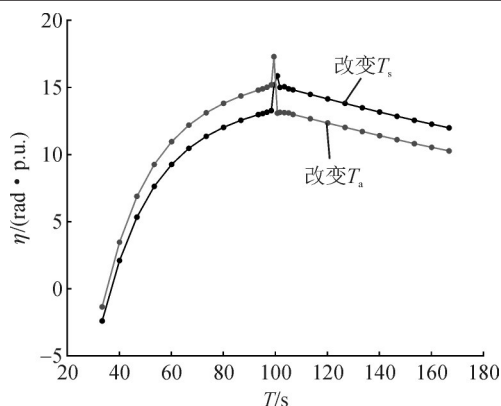


图13 机组惯量降低稳定裕度变化趋势

Fig. 13 Trend of stability margin variation with reduced generator inertia

等容量替代火电机组对系统暂态功角稳定性的影响。系统中存在10台600 MW火电机组,火电机组参数见表1,光热机组采用与火电机组相同的调速器、调压器等控制模型,故障场景见表2。

表2 故障场景

Table 2 Fault scenarios

| 故障场景 | 故障类型                                                     |
|------|----------------------------------------------------------|
| A    | bus <sub>3</sub> -bus <sub>6</sub> 联络线50%处,三相短路故障持续0.3 s |
| B    | bus <sub>6</sub> 母线处,三相短路故障持续0.3 s                       |
| C    | bus <sub>8</sub> -bus <sub>9</sub> 联络线10%处,三相短路故障持续0.3 s |
| D    | bus <sub>2</sub> -直流送端联络线50%处,三相短路故障持续0.3 s              |
| E    | bus <sub>3</sub> -直流受端联络线50%处,三相短路故障持续0.3 s              |

不同场景下的系统稳定裕度分析见表3,当光热电站等容量替代送端电网的火电机组时,与原系统相比,稳定裕度大幅减小,系统暂态功角稳定性减弱。当光热电站等容量替代受端电网的火电机组时,除故障场景D外,与原系统相比,稳定裕度同样大幅减小,系统暂态功角稳定性减弱。原系统中火电机组G<sub>3</sub>、G<sub>7</sub>、G<sub>8</sub>、G<sub>9</sub>、G<sub>10</sub>电气距离距其他机组较远,因此在发生故障时,G<sub>3</sub>、G<sub>7</sub>、G<sub>8</sub>、G<sub>9</sub>、G<sub>10</sub>构成临界机群,G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>、G<sub>4</sub>、G<sub>5</sub>、G<sub>6</sub>构成剩余机群。在故障场景D中,故障地点距G<sub>3</sub>、G<sub>7</sub>、G<sub>8</sub>、G<sub>9</sub>、G<sub>10</sub>机群较近,光热电站替代受端电网的火电机组,机组分群方式并未发生改变,临界机群仍由G<sub>3</sub>、G<sub>7</sub>、G<sub>8</sub>、G<sub>9</sub>、G<sub>10</sub>构成,此时可等效为剩余机群惯量减小,临界机群惯量不变,因此系统暂态功角稳定性得到改善。但从整体结果分析,光热电站替代火电机组会导致系统惯量降低,多数故障场景下系统暂态功角稳定性减弱。

表3 不同场景下的系统稳定裕度分析

Table 3 Analysis of system stability margin under different scenarios

| 故障场景 | 稳定裕度( $\times 10^3 \text{ rad}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) |         |         |         |         |
|------|---------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 原系统                                                     | 全阶系统    |         | 等值系统    |         |
|      |                                                         | 替代送端火电  | 替代受端火电  | 替代送端火电  | 替代受端火电  |
| A    | -0.910                                                  | -38.517 | -48.751 | -38.515 | -48.704 |
| B    | -0.112                                                  | -35.690 | -23.308 | -35.678 | -23.265 |
| C    | -0.124                                                  | -36.374 | -22.620 | -36.383 | -22.743 |
| D    | -24.575                                                 | -82.763 | -17.338 | -82.865 | -17.377 |
| E    | -0.108                                                  | -34.709 | -24.397 | -34.715 | -24.396 |

## 4 结论

文中针对光热机组的低惯量特点,基于容量加权法建立了光热电站等值模型,并从同步机组惯量降低角度利用EEAC分析了光热电站并网对系统功角稳定性影响机理,并通过含光热电站的某区域电网仿真讨论,得到以下结论:

1)当受端为无穷大系统时,光热电站等容量替代火电机组会导致系统惯量降低,稳定裕度减小,系统暂态功角稳定性减弱,且光热电站并网功率越大,系统惯量越低,暂态功角稳定性越差。

2)当受端为非无穷大系统时,针对系统正向首摆,在不改变机组功角超前、滞后关系的前提下,若满足 $\delta_0 < \delta_{sa} < \delta_c$ 时, $\ddot{\delta}_{sa} > 0$ ;  $\delta_0 < \delta_{sa} < \delta_d$ 时, $\ddot{\delta}_s > 0$ , $\ddot{\delta}_a > 0$ 的条件,临界机组惯量降低不利于系统稳定,剩余机组惯量降低有利于系统稳定。若不满足上述条件,则机组惯量降低对系统暂态功角稳定性影响需通过量化进行具体计算。

## 参考文献:

- [1] 杜尔顺,张宁,康重庆,等. 太阳能光热发电并网运行及优化规划研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(21):5765-5775.  
DU Ershun, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Reviews and prospects of the operation and planning optimization for grid integrated concentrating solar power [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21):5765-5775.
- [2] 李宗隆,柏舸,胡剑,等. 考虑光热光伏混合电站内外双重电压安全的两阶段无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023,51(20):170-179.  
LI Zonglong, BAI Ge, HU Jian, et al. Two-stage optimal reactive power control considering internal-external dual voltage security of a PV-CSP hybrid power station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20):170-179.

- [3] 张玉敏, 吴福成, 张少梅, 等. 计及CVaR的含光热电站的鲁棒机组组合模型[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 62-69.  
ZHANG Yumin, WU Fucheng, ZHANG Shaomei, et al. Robust unit commitment model with concentrating solar power plants considering CVaR[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 62-69.
- [4] 解 佗, 孙丹阳, 张 刚, 等. 计及风光不确定性的风—光—光热联合发电系统中光热电站储热容量优化配置[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 32-39.  
XIE Tuo, SUN Danyang, ZHANG Gang, et al. Optimal capacity configuration of thermal storage within csp plant in wind-PV-CSP hybrid power generation system considering uncertainty of wind and photovoltaic power[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 32-39.
- [5] WEI Shangshang, LIANG Xiufan, MOHSIN T, et al. A simplified dynamic model of integrated parabolic trough concentrating solar power plants: Modeling and validation[J]. Applied Thermal Engineering, 2020(169): 114982.
- [6] 梁修凡. 槽式太阳能发电系统的动态建模及先进控制策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
LIANG Xiufan. Dynamic modeling and advanced control of parabolic trough based solar power system[D]. Nanjing: Dongnan University, 2020.
- [7] LUO Qi, ARIYUR K B, MATHUR A K. Control-oriented concentrated solar power plant model[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(2): 623-635.
- [8] 姚凌翔, 王 杨, 肖先勇, 等. 光热电站动态建模与递阶控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5512-5524.  
YAO Lingxiang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic modelling of concentrated solar power plant and hierarchical control[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5512-5524.
- [9] 孙辉超. 光热电站主动支撑电力系统能力初探[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.  
SUN Huichao. Preliminary study on the ability of photothermal power station to actively support power system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [10] 林克曼, 王召珩, 吴 峰, 等. 光伏—光热联合发电系统动态建模与功率协调控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 110-117.  
LIN Keman, WANG Zhaohang, WU Feng, et al. Dynamic modeling and coordinated control strategy of hybrid PV-CSP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 110-117.
- [11] 戴剑丰, 汤 奕, 曲立楠, 等. 太阳能光热与风力发电协调优化控制研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(10): 73-77.  
DAI Jianfeng, TANG Yi, QU Linan, et al. Research on coordinated optimization control of solar thermal and wind power generation[J]. Computer Simulation, 2017, 34(10): 73-77.
- [12] 张尧翔, 刘文颖, 李 潇, 等. 高比例新能源接入电网光热发电—火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 1-7.  
ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, LI Xiao, et al. Optimal control method of peak load regulation combined concentrating solar power and thermal power for power grid accessed with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 1-7.
- [13] 张尧翔, 刘文颖, 庞清仑, 等. 高比例风电接入系统光热发电—火电旋转备用优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5478-5489.  
ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, PANG Qinglun, et al. Optimal power spinning reserve method of concentrating solar power and thermal power for high-proportion wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5478-5489.
- [14] 赖林琛, 周 强, 杜文娟, 等. 同型光热发电机并联聚合对光热发电场振荡稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 179-191.  
LAI Linchen, ZHOU Qiang, DU Wenjuan, et al. Impact of dynamic aggregation of same concentrating solar power generators in parallel connection on the oscillation stability of a CSP plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 179-191.
- [15] 刘 君, 赵 龙, 杜文娟, 等. 并网光热发电场振荡稳定性影响因素分析与阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3561-3574.  
LIU Jun, ZHAO Long, DU Wenjuan, et al. Analysis of influencing factors and design of damping controller for grid-connected CSP farm oscillation stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3561-3574.
- [16] DU Wenjuan, MA Zhicheng, LAI Linchen, et al. Small-disturbance stability of a concentrating solar power collecting system with multiple synchronous generators[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(17): 3426-3440.
- [17] 杨国清, 薛 雨, 姚李孝, 等. 光热电站并网对新能源电网运行特性的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 134-139.  
YANG Guoqing, XUE Yu, YAO Lixiao, et al. A study on the influence of the connected photo-thermal power station on the operation characteristics of the new energy grid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 134-139.
- [18] 潘学萍, 戚相威, 梁 伟, 等. 综合模型聚合和参数辨识的风电场多机等值及参数整体辨识[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 124-132.  
PAN Xueping, QI Xiangwei, LIANG Wei, et al. Multi-machine equivalence and global identification of wind farms by combining model aggregation and parameter estimation[J]. Electric Power Automation Equipment,

- 2022,42(1):124-132.
- [19] 邵成成,冯陈佳,李 丁,等. 光热发电机组聚合模型及其在电力系统运行模拟中的应用[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3507-3516.
- SHAO Chengcheng, FENG Chenjia, LI Ding, et al. Clustered CSP model and its application in power system operation simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (11):3507-3516.
- [20] 朱凌志,董 存,陈 宁. 新能源发电建模与并网仿真技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.
- ZHU Lingzhi, DONG Cun, CHEN Ning. Modeling and simulation for grid integration of renewable energy generation[M]. Beijing:China Waterpower Press, 2018.
- [21] 薛 雨. 光热电站接入下新能源高渗透区域电网的优化调度研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- XUE Yu. Research on optimal dispatching of new energy grid in high - permeability area under the connection of thermal power station[D]. Xi' an: Xi' an University of Technology, 2020.
- [22] 国务院国有资产监督管理委员会. 中广核:发挥太阳能热发电支撑作用助力新型电力系统建设[EB/OL]. [2024-11-30]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n26915116/n28283133/n28283153/n28283168/c28315669/content.html>.
- State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council.China general nuclear power group: Leveraging the supporting role of concentrated solar power to facilitate the development of renewable energy power system[EB/OL].[2024 - 11 - 30]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n26915116/n28283133/n28283153/n28283168/c28315669/content.html>.
- [23] ZHAO Liang, ZHOU Qiang, ZHAO Dawei, et al. Control performances of CSP generator' s excitation system and speed governor based on measured data[C]//2021 International Conference on Power System Technology. China: IEEE, 2021: 1208-1213.
- [24] 李龙源. 直驱风电场动态等值建模方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2022.
- LI Longyuan. Study of dynamic equivalent modeling methods of wind farm with DDPMSGs[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [25] 朱雪琼,薛禹胜,黄天罡. 机组惯量对暂态功角稳定性影响的复杂性[J]. 电力系统自动化,2019,43(17):72-77.
- ZHU Xueqiong, XUE Yusheng, HUANG Tiangan. Complexity of influence of generator inertia on transient angle stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17):72-77.
- 苏志军(1999—),男,硕士研究生,研究方向为新能源电力系统稳定分析(E-mail:120222201738@ncepu.edu.cn).
- 夏世威(1984—),男,博士,副教授,研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制(通信作者)(E-mail:s.w.xia@ncepu.edu.cn).
- 李庚银(1960—),男,博士,教授,博导,研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制。
- 孙冠群(1995—),男,硕士,研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制。