

基于 PSModel 的光伏场站全电磁暂态 建模与仿真

胡靖丰, 陈 众*

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

Full Electromagnetic Transient Modeling and Simulation of a Photovoltaic Power Station Based on PSModel

Hu Jingfeng, Chen Zhong*

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: [**Objective**] To address the problems that photovoltaic inverter models provided by manufacturers are mostly delivered as black-box dynamic libraries with inaccessible internal control structures, and that detailed electromagnetic transient (EMT) models for large-scale photovoltaic power stations suffer from large model size and low simulation efficiency, this paper proposes an EMT modeling method for photovoltaic units based on test data of manufacturer-supplied black-box models, as well as an equivalent modeling method for photovoltaic power stations following the principle of consistent collection-line losses. It provides a model foundation for the transient characteristic analysis of grid-connected photovoltaic power stations and large-grid simulation calculations. [**Methods**] First, the manufacturer black-box model was connected to the simulation test system, and fault ride-through tests were carried out under different active power output levels and voltage disturbance amplitudes. The response data including terminal voltage, current, active power, reactive power, d - and q -axis currents, were collected to analyze the dynamic variation laws during fault occurrence, fault duration and fault recovery. Then, the parameter set to be identified for the PSModel inverter model was constructed, including main circuit parameters, normal-operation control parameters, fault ride-through thresholds, current limiting parameters, reactive current support coefficients and time criteria. A parameter tuning process of “feature extraction—staged identification—

simulation iterative correction” was adopted, and the normalized error and comprehensive error objective function were introduced to evaluate the deviation between the PSModel model and the manufacturer black-box model. After the unit-level model verification was completed, a detailed EMT model of a 100 MW photovoltaic power station in Anhui province was established based on the PSModel platform independently developed by China Electric Power Research Institute. Furthermore, according to the actual collector network topology, the collector-line structures, including branch-trunk, trunk and radial structures, were equivalently transformed under the principle of active power loss consistency, and the photovoltaic power station equivalent model was formed. Finally, considering the many combinations of load rates, fault types and voltage disturbance amplitudes, representative operating conditions were selected for comparative verification between the detailed model and the equivalent model. Meanwhile, to avoid the limitation of evaluating the equivalent effect only by active power curves, the voltage, current, active power, reactive power and reactive current at the 35 kV bus were further selected as evaluation variables. The sectional average deviation, maximum deviation and weighted average total deviation were used for quantitative analysis. [**Results**] The established photovoltaic unit model effectively reproduced the active and reactive power dynamic response characteristics of different manufacturer models during fault ride-through. The detailed model and equivalent model of the photovoltaic power station showed basically consistent active power variation trends at the 35 kV bus during fault occurrence, fault duration and fault recovery. The multi-condition error statistics showed

基金项目: 南方电网科研院科技项目(0002200000039389)

Science and Technology Project of China Southern Power Grid
Electric Power Research Institute (0002200000039389)

that, under the selected symmetrical and asymmetrical disturbance scenarios, the sectional errors and weighted average total deviations of voltage, current, active power, reactive power and reactive current were all lower than the allowable limits specified in GB/T32892—2026.

[Conclusion] The proposed method can construct a photovoltaic unit EMT model suitable for engineering simulation when manufacturer control details cannot be fully disclosed. It can also reduce the scale of the photovoltaic power station model and improve simulation efficiency while maintaining the dynamic port characteristics at the 35 kV bus, providing an effective modeling approach for subsequent analysis of the grid-connection security and stability influence of photovoltaic power stations.

Key words: photovoltaic power station; black-box model; electromagnetic transient model; equivalent modeling; PSModel

摘 要:【目的】针对厂家光伏逆变器模型多以黑盒动态库形式提供、内部控制结构难以直接获取,以及大规模光伏场站详细电磁暂态(EMT)模型规模大、仿真效率低的问题,提出一种基于厂家黑盒模型测试数据的光伏机组 EMT 建模方法和基于集电线路损耗一致原则的光伏场站等值建模方法,为光伏场站并网暂态特性分析和大电网仿真计算提供模型基础。【方法】首先,将厂家黑盒模型接入仿真测试系统,在不同有功出力水平和不同电压扰动幅值下开展故障穿越测试,采集机端电压、电流、有功功率、无功功率以及 d 、 q 轴电流等响应数据,分析故障发生、故障持续和故障恢复阶段的动态变化规律。然后,构建 PSModel 逆变器模型的待辨识参数集合,涵盖主电路参数、正常运行控制参数、故障穿越阈值、电流限幅参数、无功电流支撑系数和时间判据等,并采用“特征量提取—分阶段辨识—仿真迭代修正”的参数整定流程,引入归一化误差和综合误差目标函数,评价 PSModel 模型与厂家黑盒模型之间的偏差。在完成机组级模型校核后,基于中国电力科学研究院自主研发的 PSModel 平台,建立安徽某 100 MW 光伏场站详细 EMT 模型;进一步依据实际集电网络拓扑,依据有功损耗一致原则对带支路干式、干式和放射式集电线路进行等值变换,得到光伏场站等值模型。最后,考虑到不同负载率、故障类型及电压扰动幅值组合较多,选取典型运行工况开展详细模型与等值模型的对比验证;同时,为避免仅依靠有功功率曲线评价等值效果的局限性,进一步选取 35 kV 母线侧电压、电流、有功功率、无功功率和无功电流作为评价量,采用分区间平均偏差、最大偏差和加权平均总偏差进行量化分析。【结果】所建立的光伏机组模型能够有效复现不同厂家模型在故

障穿越期间的有功、无功动态响应特性;光伏场站详细模型与等值模型在故障发生、故障持续及故障恢复阶段的 35 kV 母线侧有功功率变化趋势基本一致。多工况误差统计结果表明,所选对称和不对称扰动场景下,电压、电流、有功功率、无功功率及无功电流等评价量的分区间误差和加权平均总偏差均低于 GB/T32892—2026 规定的允许限值。【结论】所提方法能够在厂家控制细节不完全公开的条件下构建适用于工程仿真的光伏机组 EMT 模型,并能够在降低场站模型规模和提高仿真效率的同时保持 35 kV 母线侧端口动态外特性,为后续开展光伏场站并网安全稳定影响分析提供了有效的建模手段。

关键词: 光伏场站;黑盒模型;电磁暂态模型;等值建模;PSModel

0 引言

随着“双碳”目标的提出^[1-3],以光伏发电为代表的新能源电源大规模接入电力系统^[4-8],其装机规模和运行占比不断提高,截至 2025 年 6 月底,全国光伏发电装机容量达 11 亿千瓦,同比增长 54.1%^[9]。随着光伏电站在电力系统中渗透率的持续提高,其输出功率所具有的随机性和间歇性特征对系统惯量支撑水平及电压稳定性的不利影响日益突出。特别是在设备故障、极端天气等异常运行条件下,光伏电站可能出现功率快速波动、电压超限甚至暂态稳定性被破坏等问题,进而导致大规模脱网现象,严重威胁电网的安全稳定运行^[10-14]。为有效分析大规模光伏并网对电力系统的影响^[15],有必要针对实际厂家生产的光伏装置开展不同电压跌落故障下的暂态响应特性研究,并建立能够准确反映其动态行为的模型。现有针对光伏电站的建模方法主要包括机电暂态模型和电磁暂态(Electromagnetic Transient, EMT)模型两类^[16]。本文采用 EMT 建模方法。

为准确揭示光伏机组在电压故障过程中的暂态响应规律,需对实际光伏机组在稳态运行以及高、低电压故障穿越(Fault-Ride-Through, FRT)工况下的响应特征进行深入分析,并构建相应的精确模型^[17-19]。

厂家建立的光伏机组 EMT 模型能够较准确地反映设备在各类运行工况下的动态特性,但由于涉及核心技术保护与商业机密,实际工程中厂家通常仅提供黑盒的控制系统模型,不利

于电网规划及运行人员掌握光伏机组内部控制策略,且难以直接支撑大规模光伏电源接入实际电网的仿真研究^[20],进而影响光伏并网后续研究的顺利开展^[21]。

因此,为兼顾模型精度、仿真效率与工程可用性,面向工程应用的光伏场站通用 EMT 建模方法仍具有重要研究意义^[22]。此外,现有研究虽然对光伏系统 FRT 控制进行了较多分析,但针对光伏场站层面的 EMT 建模、详细模型与等值模型之间的协调以及大规模光伏场站的快速等值建模与验证,仍有进一步研究和完善的空间^[23]。近年来,针对基于逆变器电源的通用 EMT 建模方法已有相关研究,提出了适用于不同控制模式和应用场景的通用 EMT 模型^[24]。文献[25]提出了光伏系统的通用 EMT 模型,但对 FRT 控制过程的刻画相对有限,难以充分反映光伏设备在故障工况下的暂态特性。文献[26]采用 FRT 控制,并采集测试数据检验光伏机组 EMT 模型的有效性与准确性。随着并网要求的提高,原有较简单的 FRT 控制策略已难以满足我国现阶段 FRT 能力标准^[27]。

综上,本文提出了一种基于厂家黑盒模型的光伏机组 EMT 建模方法。对主要机型光伏机组开展大量 FRT 试验,提取并分析其故障状态下的响应特征。在此基础上,利用数据辨识确定模型参数,分别对各故障状态下光伏机组的有功与无功功率动态响应进行描述,并建立相应的控制表达关系。基于中国电科院独立研发的 PSModel EMT 仿真软件进行仿真分析。通过动态修正光伏机组模型电流参考值,实现对实际机组 FRT 暂态响应过程的有效再现。在此基础上,进一步采用基于集电线路损耗一致原则的场站等值方法,对安徽某光伏场站进行等值建模,并通过多轮参数整定,使所建模型能够顺利通过大电网测试,完成该光伏场站的 EMT 建模。

1 基于厂家黑盒模型的光伏逆变器 EMT 建模方法

为获取不同厂家光伏逆变器在 FRT 过程中的响应特征,依据中国光伏并网标准,对光伏逆变器在多工况下的 FRT 特性进行了测试^[28],测试系统结构示意图如图 1 所示。为实现光伏电站故障工况模拟,采用阻抗分压原理设计故障模拟装置,

利用串联阻抗 X_L 与并联阻抗 X_P 的切换,实现不同幅值的电压跌落条件。

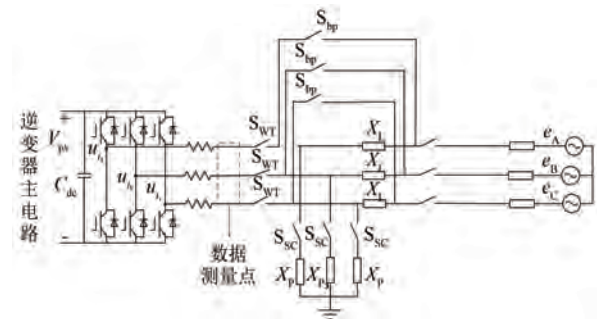


图 1 光伏逆变器 FRT 测试系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FRT test system for photovoltaic inverter

图 1 中, V_{pv} 、 C_{dc} 分别为光伏逆变器直流侧电压、直流侧电容; u_{ia} 、 u_{ib} 和 u_{ic} 为光伏逆变器交流侧三相输出电压; S_{WT} 为并网连接开关; S_{bp} 为串联电抗器旁路开关; S_{SC} 为并联支路投切开关; e_A 、 e_B 和 e_C 为等值电网三相电源电势。

根据光伏逆变器厂家黑盒模型测试得到的稳态运行数据以及高、低电压 FRT 暂态试验数据,对逆变器控制环节和外特性响应过程进行分析,以获得模型构建所需的关键参数。在此基础上,采用基于仿真拟合的参数整定方法,基于中国电科院独立研发的 PSModel EMT 仿真软件,搭建光伏逆变器白盒模型。在相同工况下,对白盒模型与厂家黑盒模型进行仿真对比,重点分析电压、电流、有功功率以及无功功率等响应特性的动态一致性,反复调整、优化模型参数,使模型能够较准确地反映实际设备的控制行为与暂态特征,从而保证模型在不同短路比、负载率及故障扰动工况下,能够较准确地反映实际电网系统的运行状态,并满足仿真精度要求。基于厂家黑盒模型的光伏逆变器 EMT 建模流程如图 2 所示。

为获取厂家黑盒模型在故障条件下的响应特性,构建多工况测试场景。采用动态库封装的厂家黑盒模型作为被测对象接入平台,并以等效交流电源模拟外部大电网。设置光伏机组的有功出力水平分别为 90% 和 20%; 设置电压跌落故障工况的跌落幅值分别为 0.9 pu、0.75 pu、0.5 pu、0.35 pu 和 0.2 pu。采集量主要包括机端电压 U 、输出有功功率 P 、无功功率 Q 以及 d 、 q 轴电流 i_d 、 i_q 和 d 、 q 轴电压 U_d 、 U_q 。

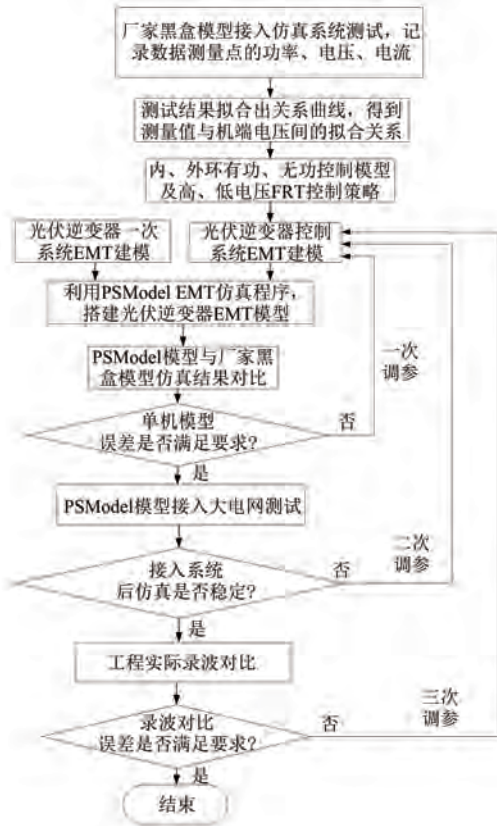


图2 基于厂家黑盒模型的光伏逆变器 EMT 建模流程

Fig.2 EMT modeling workflow for photovoltaic inverter based on manufacturer black-box model

针对多故障测试工况下获得的测量结果,首先对各响应量进行分类整理,并分析机端电压、功率及 d, q 轴变量之间的关联特征,进而构建相应的数学关系。在此基础上,提取有功、无功控制指令及 d, q 轴电流变化中的关键分界点,为后续模型参数辨识提供依据。考虑到不同厂家和不同机型在控制结构及参数配置上存在差别,仅依靠初步拟合结果难以准确复现厂家模型的动态特性,因此需结合响应误差对模型参数和函数关系进行多轮修正。

为提高基于厂家黑盒模型的光伏逆变器 EMT 建模方法的可复现性,采用“特征量提取—分阶段辨识—仿真迭代修正”的参数辨识流程。待辨识参数主要包括主电路参数、正常运行控制参数、FRT 控制参数以及时间判据。待辨识参数集合为

$$\theta = \{C_{dc}, L_1, C_f, L_2, K_{P_{V_{PV}}}, K_{L_{V_{PV}}}, K_{P_{Q}}, K_{L_{Q}}, K_{P_c}, K_{L_c}, U_{set}, U_{set1}, U_{set2}, U_{set3}, k', k, i_{sum_max}, T_{LVRT}, T_{HVRT}, T_{rec}\} \quad (1)$$

式中: L_1, C_f 和 L_2 为滤波支路参数; $K_{P_{V_{PV}}}, K_{L_{V_{PV}}}, K_{P_{Q}}, K_{L_{Q}}$ 和 K_{P_c} 和 K_{L_c} 分别为直流电压外环、无功功率外环和电流内环比例积分 (Proportional Integral, PI) 参数; $U_{set}, U_{set1}, U_{set2}$ 和 U_{set3} 为 FRT 控制阈值; k' 为无功电流支撑斜率; k 为低电压穿越期间有功限幅系数; i_{sum_max} 为逆变器最大允许输出电流; T_{LVRT}, T_{HVRT} 和 T_{rec} 分别为低电压穿越、高电压穿越和故障恢复过程中的时间判据。

设第 s 个测试工况下厂家黑盒模型输出为 $x_b^s(n)$, PSModel 模型输出为 $x_p^s(n, \theta)$, 评价变量包括电压、电流、有功功率、无功功率及无功电流, 集合为 $M = \{U_s, I, P, Q, I_q\}$ 。

第 s 个测试工况下, 定义 PSModel 模型与厂家黑盒模型之间的归一化误差为

$$e_x^s(n) = \frac{x_p^s(n, \theta) - x_b^s(n)}{x_{base}} \quad (2)$$

式中: x_{base} 为对应电气量的基准值。

为综合评价多工况、多电气量下 PSModel 模型与厂家黑盒模型之间的整体偏差, 定义综合误差评价量为 $J(\theta)$, 并将其作为参数辨识的目标函数。 $J(\theta)$ 表达式为

$$J(\theta) = \frac{1}{N_s N_M} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{x \in M} \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} [e_x^s(n)]^2 \quad (3)$$

式中: N_s 为测试工况数量; N_M 为评价变量数量; N_s 为第 s 个工况中的采样点数。

$J(\theta)$ 越小, 表明 PSModel 模型与厂家黑盒模型在多工况下的整体响应越接近。需要说明的是, 本文并未采用遗传算法、粒子群算法等自动优化算法直接求解最优参数, 而是将 $J(\theta)$ 作为参数整定过程中的综合误差评价依据, 并结合各区间误差指标对参数进行仿真迭代修正。具体辨识过程如下: 首先, 利用故障前稳态数据确定逆变器初始运行点, 包括 P_0, Q_0, U_0, i_{d0} 和 i_{q0} ; 其次, 根据电压跌落后电流、电压及功率响应发生明显变化的时刻, 辨识低电压穿越和高电压穿越触发阈值及对应延时时间; 再次, 根据故障期间 I_q 与电压偏差之间的关系辨识无功电流支撑斜率 k' , 根据有功电流限制关系辨识有功限幅系数 k 和最大输出电流 i_{sum_max} ; 最后, 以厂家黑盒模型输出曲线为基准, 对直流侧电容、滤波支路参数、内外环 PI 控制参数及限幅参数进行迭代修正, 使模型在不同负载率、不同故障

类型及不同电压扰动幅值下均具有较好的一致性。

参数整定的收敛判据为: 在所选验证工况下, U_s 、 I 、 P 、 Q 和 I_q 的误差指标均满足 GB/T32892-2026 光伏发电系统模型及参数测试规程中模型验证标准限值。当上述条件满足时, 认为 PSMModel 模型能够通过厂家黑盒模型测试数据的误差校核, 参数辨识和模型整定过程完成。

基于 PSMModel 平台进行光伏机组建模, 主要包括光伏电池阵列、光伏逆变器及其控制系统等^[29]。光伏机组控制系统建模主要是对光伏逆变器进行建模, 若要准确再现实际光伏逆变器在故障期间维持正常运行时的控制过程及其 FRT 全阶段暂态响应, 关键在于构建能够真实反映其动态特性的逆变器模型。光伏机组控制系统结构如图 3 所示。

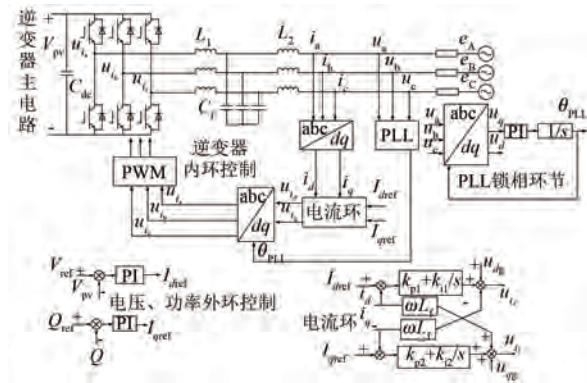


图 3 光伏机组控制系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of photovoltaic units control system

在正常并网运行工况下, 逆变器以 i_d 为控制量维持直流母线电压稳定, 同时通过 i_q 控制逆变器的无功功率输出, 实现有功与无功功率的解耦控制。有功、无功电流参考值 I_{dref} 、 I_{qref} 为

$$\begin{cases} I_{dref} = K_{P_{V_{pv}}}(V_{ref} - V_{pv}) + K_{L_{V_{pv}}} \int (V_{ref} - V_{pv}) dt \\ I_{qref} = K_{P_Q}(Q_{ref} - Q) + K_{L_Q} \int (Q_{ref} - Q) dt \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_{ref} 、 Q_{ref} 分别为直流侧电压参考值、无功功率参考值。

在电流内环中, 基于 i_d 和 i_q 经过 PI 控制器调节, 可求得光伏逆变器变换后的输出电压 u_{id} 及 u_{iq} , 具体表达式为

$$\begin{cases} u_{id} = u_{dg} - \omega L_f i_q + K_{P_{c}}(I_{dref} - i_d) + K_{L_c} \int (I_{dref} - i_d) dt \\ u_{iq} = u_{qg} + \omega L_f i_d + K_{P_{c}}(I_{qref} - i_q) + K_{L_c} \int (I_{qref} - i_q) dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_f 为滤波器电感; u_{dg} 、 u_{qg} 分别为经过坐标变换后的电网电压 d 、 q 轴分量, ω 为锁相环输出的系统当前频率。

完成测试后, 依据故障过程中各电气量的响应特征, 对典型光伏逆变器的 FRT 控制行为进行重新抽象。分析结果表明, 厂家 EMT 模型在不对称电压跌落条件下均未引入负序电流调节分量, 即其负序电流输出始终为零。因此, 在描述光伏逆变器的 FRT 动态特性时, 无需额外构建负序控制环节, 只需给定正序 d 、 q 轴电流参考量 i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ , 即可表征其在对称及不对称故障下的主要控制过程。

(1) 厂家光伏逆变器模型 1

当并网点电压 U 降至设定阈值 U_{set} 以下且持续时间达 5 ms, 逆变器进入低电压 FRT 状态。此时控制策略首先满足无功支撑需求, 因此 i_{qref}^+ 表示为

$$i_{qref}^+ = \min[k'(U_d^+ - U_{set}) + i_{q0}^+, i_{sum_max}] \quad (6)$$

式中: i_{q0}^+ 为故障前的正序 q 轴电流参考量; U_d^+ 为电网电压的 d 轴正序分量。

在 FRT 期间, i_{dref}^+ 沿用故障前的设定值, 以维持有功控制的连续性。考虑到逆变器允许输出电流存在上限, 且无功电流将占据部分容量, i_{dref}^+ 取值还需满足相应限制条件, 即:

$$i_{dref}^+ = \min\left[\frac{P_0}{U_d^+}, \sqrt{i_{sum_max}^2 - (i_{qref}^+)^2}\right] \quad (7)$$

当 $U > U_{set}$ 且持续时间达 5 ms, 逆变器进入高电压 FRT 状态。此时, 控制目标转为通过吸收无功电流实现过电压调节, 从而使电网电压尽快恢复。对应的 i_{qref}^+ 为

$$i_{qref}^+ = \min[k'(U_d^+ - U_{set}) + i_{q0}^+, i_{sum_max}] \quad (8)$$

在 FRT 期间, i_{dref}^+ 沿用故障前的设定值, 以维持有功控制的连续性。考虑到逆变器允许输出电流存在上限, 且无功电流将占据部分容量, i_{dref}^+ 需满足:

$$i_{dref}^+ = \frac{P_0}{U_0} \text{ 且 } i_{dref}^+ < \sqrt{i_{sum_max}^2 - i_q^2} \quad (9)$$

(2) 厂家光伏逆变器模型 2

当 $U < U_{set}$ 且持续时间达 7 ms, 逆变器进入低电压 FRT 状态。若此时 U 满足 $U_{set2} < U < U_{set1}$, 则系统进入状态 1。逆变器控制策略为: q 轴用于生成无功电流参考量, d 轴用于限制有功功率水平, 其上限取正常运行状态对应值的 k 倍。数学表达式为

$$i_{qref}^+ = i_{q0}^+ \quad (10)$$

$$i_{dref}^+ = \min\left(k \frac{P_0}{U_d^+}, 1.18 \text{ pu}\right) \quad (11)$$

当 U 满足 $U_{set3} < U < U_{set2}$ 时, 控制模式转入状态 2。逆变器控制策略为: 依据给定斜率 k' 调整 q 轴无功输出且保持 d 轴有功功率受限于正常运行值的 k 倍范围内。数学表达式为

$$i_{qref}^+ = \min[k'(U_d^+ - U_{set1}) + i_{q0}^+, 1.15 \text{ pu}] \quad (12)$$

$$i_{dref}^+ = \min\left(k \frac{P_0}{U_d^+}, 1.18 \text{ pu}\right) \quad (13)$$

当 $U > U_{set}$ 且持续时间达 7 ms, 逆变器进入高电压 FRT 状态。逆变器控制策略为: 通过吸收无功电流实现过电压调节, 促进电网电压恢复, 而 d 轴有功功率仍按照正常运行值维持不变。数学表达式为

$$i_{qref}^+ = \min[k'(U_d^+ - U_{set}) + i_{q0}^+, 1.65 \text{ pu}] \quad (14)$$

$$i_{dref}^+ = \min\left(\frac{P_0}{U_d^+}, 1.65 \text{ pu}\right) \quad (15)$$

为检验所建模型的适用性, 在不同短路比、负载率以及电压跌落(抬升)条件下, 分别获取 PSModel EMT 模型与厂家光伏逆变器模型的仿真波形, 并开展对比分析。结合两类模型在动态响应上的差别, 对控制系统实施首轮参数整定, 重点修正直流侧电容、滤波支路电容等关键参数。逆变器参数整定内容主要涉及内外环 PI 控制器参数及限幅值、高低电压 FRT 控制系数和相关阈值。并结合中国光伏机组模型验证标准对所建 EMT 模型进行验证, 以筛选出满足要求的模型, 为下一阶段大电网测试奠定基础。

将经整定后的光伏逆变器 EMT 模型接入实际电网仿真系统, 针对不同运行方式及典型工况

开展联合仿真和全 EMT 计算。结合模型在各测试场景中的响应偏差, 对控制系统实施第二轮参数优化, 以提升其在大电网中的适配能力。若后续能够取得工程录波数据, 则可进一步通过仿真波形与实测波形的对照分析开展第三轮整定, 从而增强模型对实际运行过程的复现效果。

2 PSModel 模型与厂家模型对比

按照图 2 所示建模流程, 基于 PSModel 平台构建厂家模型 2 的 EMT 模型。厂家模型与 PSModel 模型在高、低负载率(90%、20%), 对称故障及不对称故障工况下的有功、无功功率响应对比结果如图 4 所示。

我国光伏逆变器模型验证标准对模型验证的评价内容及误差限值作出了明确规定^[30], 评估指标主要包括电压 U_s 、电流 I 、有功功率 P 、无功功率 Q 以及无功电流 I_q 。

按照标准, 在进行模型验证误差计算前, 需基于电压扰动过程将试验数据与仿真数据划分为扰动前(A时段)、扰动期间(B时段)及扰动后(C时段)。其中 A 时段为扰动前的稳态区间, 并在 B、C 时段内进一步划分暂态区间与稳态区间。

在误差分析中, 暂态区间只以平均偏差作为评价量, 采用 F_2 表征; 稳态区间则从平均偏差和最大偏差两个方面进行衡量, 分别采用 F_1 和 F_3 表征。在此基础上, 依据标准规定的权重系数, 对各区段误差进行加权, 得到仿真与试验数据之间的加权平均总偏差, 采用 F_c 表征。

各电气量对应的最大允许偏差如表 1 所示。其中, U_n 、 I_n 和 P_n 分别为额定电压、额定电流和额定有功功率; F_{1max} 和 F_{2max} 分别为稳态区间和暂态区间的平均偏差; F_{3max} 为稳态区间的最大偏差; F_{Gmax} 为所有区间加权平均总偏差。

表 1 各电气量允许最大偏差值

Tab. 1 Maximum allowable deviation values for each electrical quantity

电气量	F_{1max}	F_{2max}	F_{3max}	F_{Gmax}
$\Delta U_s / U_n$	0.02	0.05	0.05	0.05
$\Delta I / I_n$	0.10	0.20	0.15	0.15
$\Delta I_q / I_n$	0.10	0.20	0.15	0.15
$\Delta P / P_n$	0.10	0.20	0.15	0.15
$\Delta Q / P_n$	0.10	0.20	0.15	0.15

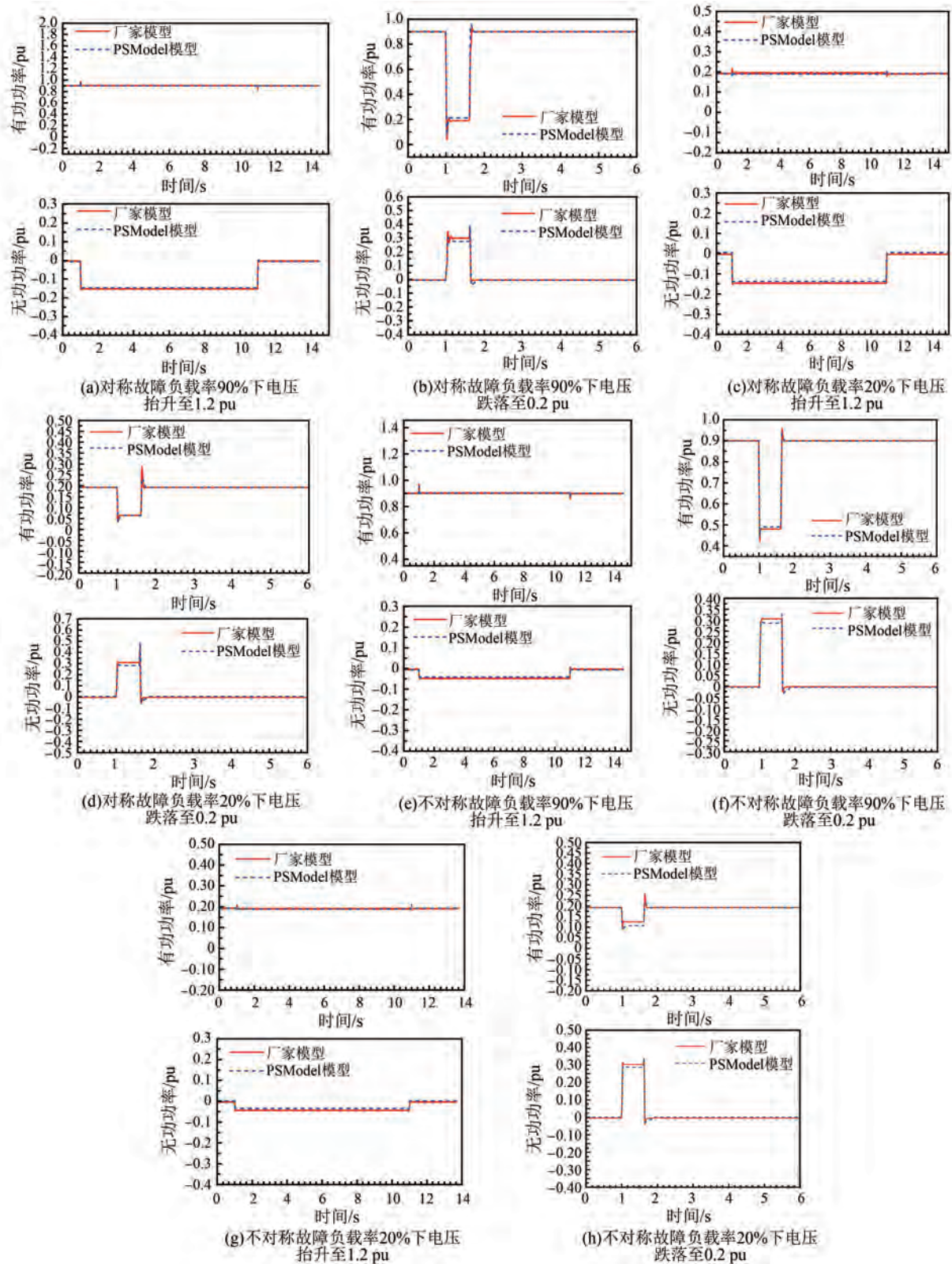


图 4 厂家模型和 PSModel 模型功率响应结果对比

Fig. 4 Comparison of power response results between the manufacturer model and the PSModel model

选取厂家模型 1 和厂家模型 2,在高、低功率(90%、20%)运行条件下分别构造电压抬升至 1.2 pu 及跌落至 0.2 pu 的典型场景,对仿真结果与测试结果在不同区间内的误差进行了对比,结果如图 5~8 所示。

图 5~8 中,E1 表示 A 段稳态区间的 F_1 ;E2 表示 B 段暂态区间的 F_2 ;E3 表示 B 段稳态区间的 F_1 ;

E4 表示 C 段暂态区间的 F_2 ;E5 表示 C 段稳态区间的 F_1 ;E6 表示 A 段稳态区间的 F_3 ;E7 表示 B 段稳态区间的 F_3 ;E8 表示 C 段稳态区间的 F_3 ;E9 表示各个区间的加权平均总偏差 F_C 。图 5~8 给出了各个区间的 $F_1 \sim F_3$ 和 F_C 的规范设定的最大值。可见, U_s 、 I 、 P 、 Q 和 I_q 的误差均小于规范设定的最大值,进一步验证了该辨识方法和模型的有效性和准确性。

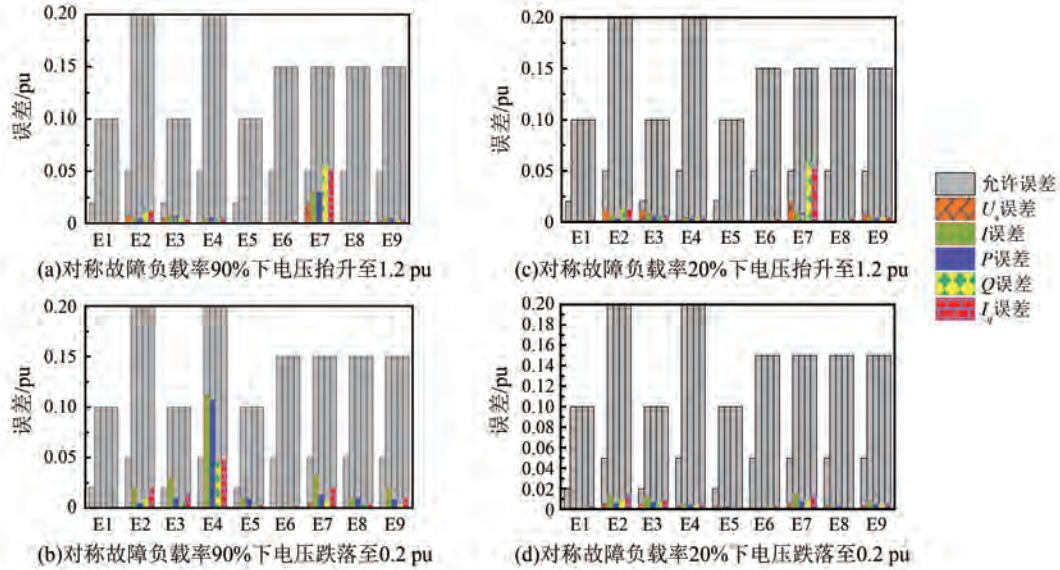


图 5 对称故障工况下厂家模型 1 与 PSModel 模型误差结果

Fig. 5 Error results between manufacturer model 1 and PSModel under symmetrical fault conditions

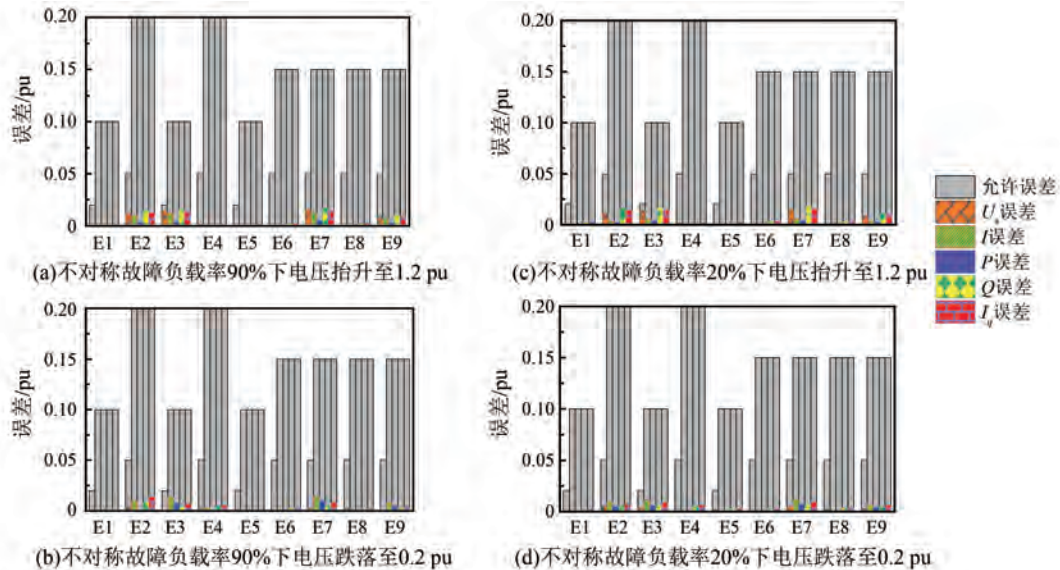


图 6 不对称故障工况下厂家模型 1 与 PSModel 模型误差结果

Fig. 6 Error results between manufacturer model 1 and PSModel under asymmetrical fault conditions

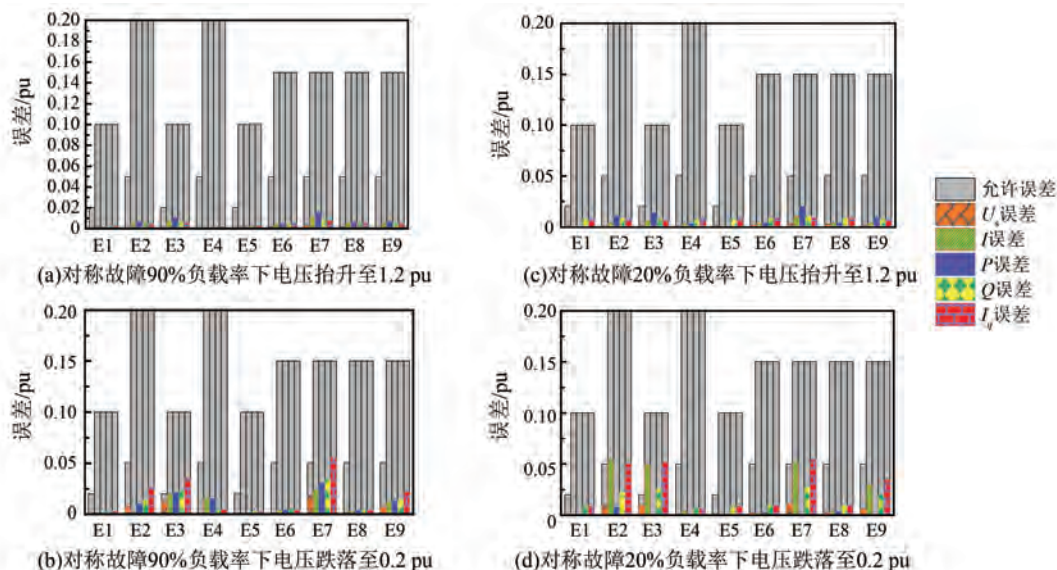


图 7 对称故障工况下厂家模型 2 与 PSModel 模型误差结果

Fig. 7 Error results between manufacturer model 2 and PSModel under symmetrical fault conditions

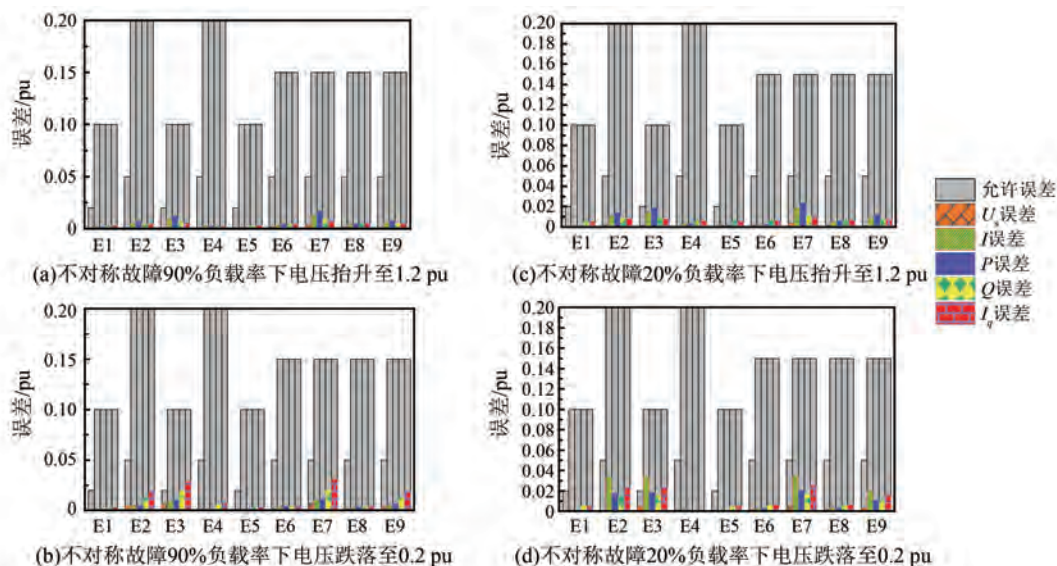


图 8 不对称故障工况下厂家模型 2 与 PSModel 模型误差结果

Fig. 8 Error results between manufacturer model 2 and PSModel under asymmetrical fault conditions

3 PSModel 光伏逆变器模型的系统测试

本文算例的光伏装机容量为 100 MW, 以建设 140 台单机容量为 0.5 MW (厂家模型 1) 和 93 台单机容量为 0.32 MW (厂家模型 2) 级光伏发电机组为例。

该光伏场站一共有 9 条集电线路。其中 0.5 MW 型号的光伏逆变器两台聚合成一台, 并通

过 0.315/37 kV 箱变接入集电线路; 0.32 MW 型号的光伏逆变器十台聚合成一台, 其中有一个箱变连接的光伏逆变器是由三台聚合成一台, 并通过 0.8/37 kV 箱变接入集电线路。每条集电线路经阻抗接入主变低压侧 35 kV 母线, 然后经过主变, 通过 220 kV 母线送至光伏电站。光伏场站拓扑结构如图 9 所示。

3.1 光伏场站的等值

根据光伏场站的拓扑结构, 将全部光伏逆变器和每段导线进行 EMT 建模, 两种型号的光伏逆

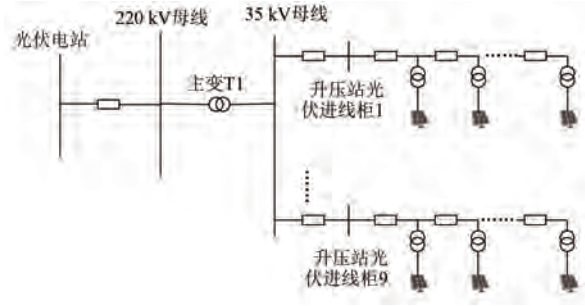


图9 光伏场站拓扑结构

Fig. 9 Photovoltaic power station topology

变器共计 233 台。已知目前 PSCAD 和 Matlab 软件无法达到此种仿真规模,而由中国电力科学研究院开发的 PSMModel EMT 软件具备所有光伏逆变器、导线及变压器的全 EMT 仿真计算能力。但 PSMModel 软件仿真运行 233 台光伏逆变器的计算量较大,计算速度偏慢。针对此问题,对 233 台光伏逆变器组成的光伏场站进行等值。

由于等值涉及的导线线路较短,所以只考虑线路的阻抗。由于此场站涉及到两种型号的逆变器以及箱变,所以将 140 台光伏逆变器及对应的箱变等效为 1 台逆变器与箱变;93 台光伏逆变器及对应的箱变等效为 1 台逆变器与箱变。由此,提出一种基于集电线路损耗一致的光伏场站等值方法。任意复杂拓扑结构的光伏场站集电线路均可归类为干式、带支路干式和放射式三种基本结构。等值过程如下。

(1) 首先将所有带支路干式结构等值为干式结构;

(2) 然后将所有干式结构等值为放射式结构;

(3) 最后将放射式结构等值成一个或 N 个用户需要结构的等值阻抗。

通过等值方法简化光伏场站 EMT 建模中集电线路等值阻抗计算的繁琐程度,提高并网点的电压、有功功率和无功功率的仿真精度。

3.1.1 带支路干式线路的等值过程

将带支路的干式线路等效为干式线路的等值过程如图 10~11 所示。

支路上每一截的压降 ΔU_{a1} 、 ΔU_{a2} 、 $\dots$ 、 ΔU_{an} 定义为

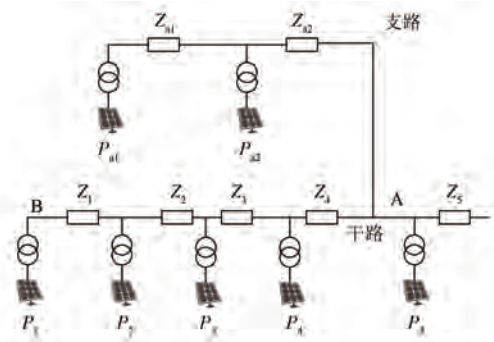


图10 支路+干路

Fig. 10 Branch-and-trunk configuration

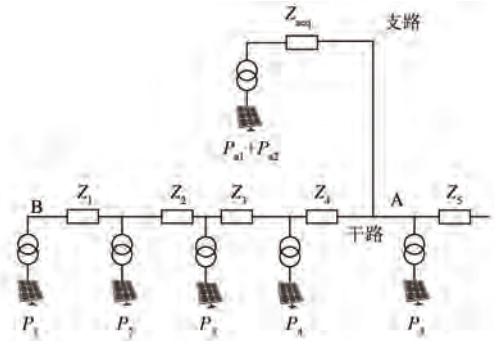


图11 支路变干路

Fig. 11 Branch-to-trunk configuration

$$\begin{cases} \Delta U_{an} = Z_{an} (I_{a1} + I_{a2} + \dots + I_{an}) \\ \dots \\ \Delta U_{a2} = Z_{a2} (I_{a1} + I_{a2}) \\ \Delta U_{a1} = Z_{a1} I_{a1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: n 为支路机组总台数; $I_{a1} \sim I_{an}$ 为第 1 台~ n 台光伏机组注入支路的电流; $Z_{a1} \sim Z_{an}$ 为与第 1~ n 台支路机组连接的线路阻抗。

将式(16)转换为等效损耗来表示:

$$\begin{cases} S_{\text{Loss}_Z_{an}} = \Delta U_{an} (I_{a1}^* + I_{a2}^* + \dots + I_{an}^*) = \\ Z_{an} \frac{(P_{a1} + P_{a2} + \dots + P_{an})^2}{3U^2} \\ \dots \\ S_{\text{Loss}_Z_{a2}} = \Delta U_{a2} (I_{a1}^* + I_{a2}^*) = \\ Z_{a2} \frac{(P_{a1} + P_{a2})^2}{3U^2} \\ S_{\text{Loss}_Z_{a1}} = \Delta U_{a1} I_{a1}^* = Z_{a1} \frac{P_{a1}^2}{3U^2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $S_{\text{Loss}_{Z_{a1}}} \sim S_{\text{Loss}_{Z_{an}}}$ 分别为支路线路阻抗 $Z_{a1} \sim Z_{an}$ 的复功率损耗; $I_{a1}^* \sim I_{an}^*$ 分别为第 1~n 台光伏机组注入支路电流的共轭值; $P_{a1} \sim P_{an}$ 为第 1~n 台支路机组有功功率。

等效后的损耗为

$$S_{\text{Loss}_{Z_{\text{eq}}}} = Z_{\text{eq}} (I_{a1} + I_{a2} + \dots + I_{an}) \times (I_{a1} + I_{a2} + \dots + I_{an})^* = Z_{\text{eq}} \frac{(P_{a1} + P_{a2} + \dots + P_{an})^2}{3U^2} \quad (18)$$

式中: Z_{eq} 为支路的等值阻抗。

故有:

$$Z_{\text{eq}} = \frac{Z_{a1} P_{a1}^2 + \dots + Z_{an} (P_{a1} + \dots + P_{an})^2}{(P_{a1} + \dots + P_{an})^2} \quad (19)$$

将 Z_{eq} 插入到干线中, 得到如图 12 所示的结果。

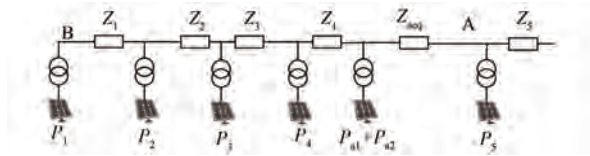


图 12 纯粹干路

Fig. 12 Pure trunk configuration

第 j 台干路机组有功功率 P_j 和支路电流流过等值阻抗 Z_{eq} 的损耗等于等效前的损耗, 等值过程推导如下:

$$S_{\text{Loss}_{Z_{\text{eq}}}} = Z_{\text{eq}} \left(I_1 + I_2 + \dots + I_m + \sum_{i=1}^n I_{ai} \right) \times \left(I_1 + I_2 + \dots + I_m + \sum_{i=1}^n I_{ai} \right)^* = Z_{\text{eq}} \frac{\left(\sum_{j=1}^m P_j + \sum_{i=1}^n P_{ai} \right)^2}{3U^2} \quad (20)$$

式中: m 为干路机组总台数。

结合式 (18)~式 (20), 可以推导出:

$$Z_{\text{eq}} = \frac{P_{a1}^2 Z_{a1} + \dots + (P_{a1} + \dots + P_{an})^2 Z_{an}}{\left(\sum_{j=1}^m P_j + \sum_{i=1}^n P_{ai} \right)^2} \quad (21)$$

由此得到 Z_{eq} 表达式为

$$Z_{\text{eq}} =$$

$$\left(\frac{\sum_{i=1}^1 P_{ai}}{\sum_{j=1}^m P_j + \sum_{i=1}^n P_{ai}} \right)^2 Z_{a1} + \left(\frac{\sum_{i=1}^2 P_{ai}}{\sum_{j=1}^m P_j + \sum_{i=1}^n P_{ai}} \right)^2 Z_{a2} + \dots + \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_{ai}}{\sum_{j=1}^m P_j + \sum_{i=1}^n P_{ai}} \right)^2 Z_{an} \quad (22)$$

3.1.2 干式线路转换为放射式线路的等值过程

将干式线路等效为放射式线路的等值过程如图 13 所示。

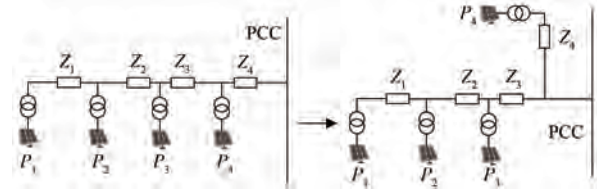


图 13 干式线路等效为放射式线路的等值过程

Fig. 13 Equivalent process of transforming a trunk line into a radial line

根据带支路的干式线路等值过程的推导, 在功率损耗一致的情况下, 干式线路的损耗为

$$\begin{cases} S_{\text{Loss}_{Z_m}} = \Delta U_m (I_1^* + I_2^* + \dots + I_m^*) = Z_m \frac{(P_1 + P_2 + \dots + P_m)^2}{3U^2} \\ \dots \\ S_{\text{Loss}_{Z_2}} = \Delta U_2 (I_1^* + I_2^*) = Z_2 \frac{(P_1 + P_2)^2}{3U^2} \\ S_{\text{Loss}_{Z_1}} = \Delta U_1 I_1^* = Z_1 \frac{P_1^2}{3U^2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\Delta U_1 \sim \Delta U_m$ 为干路上每一截的压降; $Z_1 \sim Z_m$ 为第 1~m 台干路机组连接的线路阻抗; $P_1 \sim P_m$ 为第 1~m 台干路机组有功功率; $I_1^* \sim I_m^*$ 为第 1~m 台干路机组电流的共轭值。

将 4 号光伏逆变器转换成支路后, 线路的损耗为

$$\begin{cases} S_{\text{Loss}_{Z_{\text{eq}}}} = \Delta U_4 I_4^* = Z_{\text{eq}} \frac{P_4^2}{3U^2} \\ S_{\text{Loss}_{Z_3}} = \Delta U_3 (I_1^* + I_2^* + I_3^*) = Z_3 \frac{(P_1 + P_2 + P_3)^2}{3U^2} \\ S_{\text{Loss}_{Z_2}} = \Delta U_2 (I_1^* + I_2^*) = Z_2 \frac{(P_1 + P_2)^2}{3U^2} \\ S_{\text{Loss}_{Z_1}} = \Delta U_1 I_1^* = Z_1 \frac{P_1^2}{3U^2} \end{cases} \quad (24)$$

因此,在保证功率损耗一致的情况下,可推导出:

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\left(\sum_{j=1}^4 P_j\right)^2}{P_4^2} Z_4 \quad (25)$$

3.1.3 干式线路等效为一台的等值过程

干式线路等效为一台的等值过程如图 14 所示。

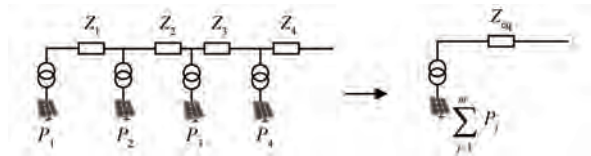


图 14 干式线路等效为一台的等值过程

Fig. 14 Equivalent process of reducing a trunk line to a single unit

干式线路等值阻抗 Z_{eq} 表达式为

$$Z_{\text{eq}} = \left(\frac{\sum_{j=1}^1 P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} \right)^2 Z_1 + \left(\frac{\sum_{j=1}^2 P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} \right)^2 Z_2 + \cdots + \left(\frac{\sum_{j=1}^m P_j}{\sum_{j=1}^m P_j} \right)^2 Z_m \quad (26)$$

3.1.4 放射式线路等效为一台的等值过程

放射式线路等效为一台的等值过程如图 15 所示。

根据干式线路的等值方法,可得放射线路等值阻抗 Z_{eq} 表达式为

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j^2 Z_j)}{\left(\sum_{j=1}^m P_j\right)^2} \quad (27)$$

上述等值方法适用于光伏场站不同数量光伏

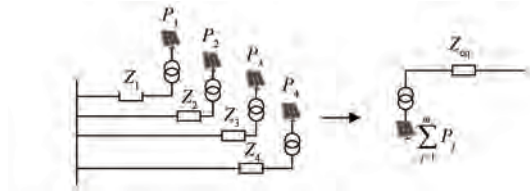


图 15 放射式线路等效为一台等值过程

Fig. 15 Equivalent process of reducing a radial line to a single unit

逆变器任意形式的串并联组合,在保障等效前后功率损耗一致的情况下,并且场站的馈线网络的充电功率基本不变。等值后的光伏场站拓扑图如图 16 所示。

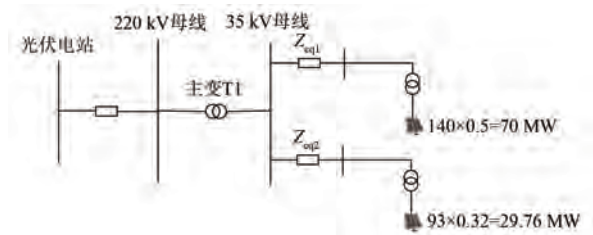


图 16 光伏场站等值拓扑

Fig. 16 Equivalent topology of the Photovoltaic power station

3.2 详细模型与等值模型的对比验证

为验证所提基于集电线路损耗一致原则的新能源场站快速等值建模方法的有效性,在 PSMoel 平台上分别建立光伏电站详细模型与等值模型,并对两种模型在典型工况下的动态响应进行对比分析。考虑到不同负载率、不同故障类型及不同电压扰动幅值下的仿真工况数量较多,本文选取能够表征不同运行状态和故障特征的典型工况进行验证,即在 90% 和 20% 负载率时,分别设置对称和不对称电压扰动条件的 1.2 pu 高电压穿越与 0.2 pu 低电压穿越工况。

对详细模型与等值模型在 35 kV 母线侧的有功功率标幺值进行曲线对比,以直观反映两种模型在故障发生、故障持续及故障恢复过程中的功率动态变化趋势。由于本文所提等值方法以集电线路损耗一致为基本原则,而集电线路损耗主要体现为有功功率损耗,因此有功功率能够较直接反映等值模型对场站功率传输特性的保持能力。

同时,为避免仅依靠有功功率曲线判断等值模型精度的局限性,本文进一步选取 35 kV 母线侧电压、电流、有功功率、无功功率及无功电流作

为评价指标,采用平均偏差和最大偏差对详细模型与等值模型的动态响应一致性进行量化分析。考虑到多工况、多电气量曲线数量较多,本文仅给出典型工况下 35 kV 母线侧有功功率对比曲线,其余电气量通过误差统计表进行综合评价。该处理方式既能够展示详细模型与等值模型的动态响应趋势,又能够通过多电气量误差指标对等值模

型的端口外特性保持能力进行定量验证。

3.2.1 对称电压扰动工况对比分析

在对称电压扰动工况下,对光伏电站详细模型与等效模型的动态响应进行对比分析。图 17 给出了 90% 与 20% 负载率时,详细模型与等值模型在对称 1.2 pu 高电压穿越及 0.2 pu 低电压穿越工况下 35 kV 母线侧有功功率的对比结果。

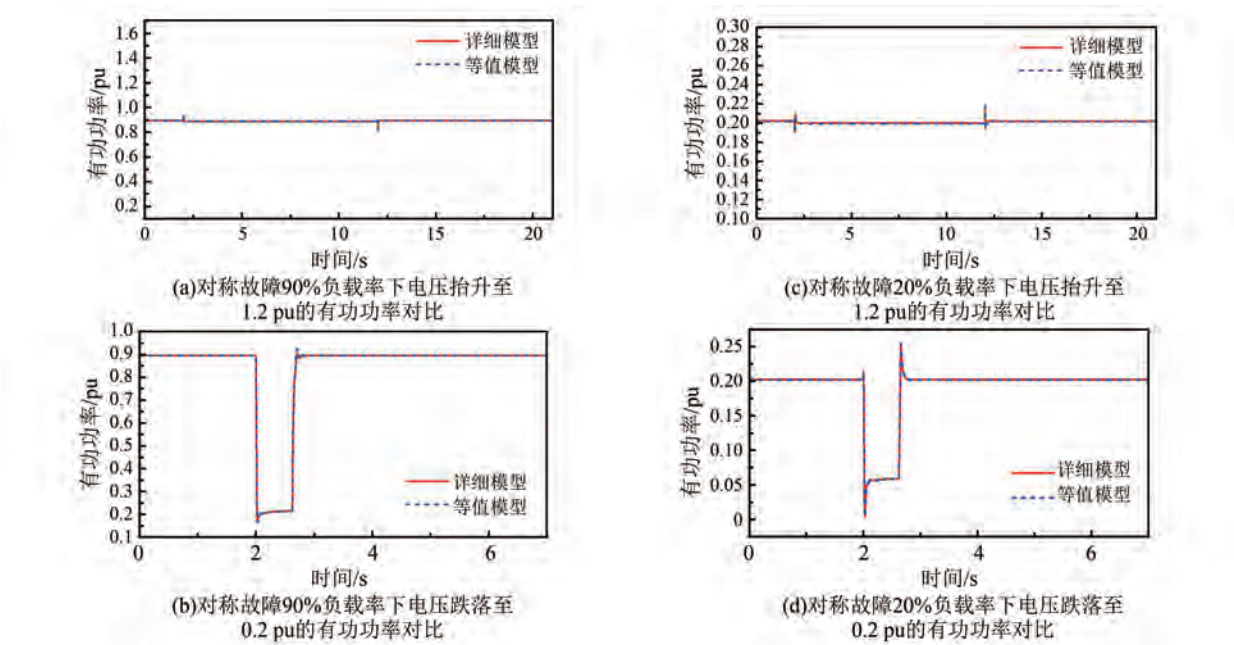


图 17 对称故障下详细模型与等值模型 35 kV 母线侧有功功率对比

Fig. 17 Comparison of active power at the 35 kV bus side between the detailed model and the equivalent model under symmetrical fault

由图 17 可知,在两种负载率下,等值模型与详细模型的有功功率变化趋势基本一致。在对称低压穿越工况下,随着母线电压跌落,光伏场站输出有功功率迅速下降,故障切除后逐步恢复。等效模型较好地跟踪了详细模型的功率变化过程,表明所提等值方法能够有效保持场站在低电压暂降过程中的功率动态特性。在对称高压穿越工况下,两种模型的有功功率响应同样表现出较高一致性,说明该等值方法不仅适用于低压扰动工况,也能够较好地反映电站在高电压扰动条件下的动态行为。

为进一步量化对称电压扰动工况下详细模型与等值模型的一致性,本文参照光伏发电系统模型验证误差评价方法,对 35 kV 母线侧电压、电流、有功功率、无功功率及无功电流进行分区间误差统计,结果如表 2~5 所示。通过分区间误差统计,可以从稳态跟踪能力、暂态响应一致性以及整

体加权误差等方面综合评价等值模型对详细模型端口动态特性的保持能力。

表 2 对称故障 90% 负载率 1.2 pu 高电压穿越工况下详细模型与等值模型误差统计

Tab. 2 Error statistics between the detailed model and the equivalent model under the 1.2 pu high-voltage ride-through condition with symmetrical fault at 90% load rate					
指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E2	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E3	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.001 4	0.001 2
E4	0.000 0	0.000 3	0.000 8	0.002 4	0.002 0
E5	0.000 0	0.000 3	0.000 8	0.002 7	0.002 2
E6	0.000 0	0.000 5	0.000 6	0.001 1	0.001 0
E7	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E8	0.000 0	0.000 6	0.000 6	0.000 4	0.000 4
E9	0.000 0	0.000 3	0.000 6	0.001 5	0.001 3

表 3 对称故障 90% 负载率 0.2 pu 低电压穿越工况下
详细模型与等值模型误差统计

Tab. 3 Error statistics between the detailed model and
the equivalent model under the 0.2 pu low-voltage
ride-through condition with symmetrical fault at
90% load rate

指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E2	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E3	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E4	0.000 0	0.001 3	0.002 1	0.003 5	0.017 5
E5	0.000 0	0.004 1	0.002	0.003 9	0.019 7
E6	0.000 0	0.010 9	0.011 1	0.005 0	0.006 0
E7	0.000 0	0.000 8	0.000 0	0.000 5	0.000 5
E8	0.000 0	0.005 6	0.005 6	0.003 4	0.003 4
E9	0.000 0	0.000 9	0.001 5	0.002 3	0.010 7

表 4 对称故障 20% 负载率 1.2 pu 高电压穿越工况下
详细模型与等值模型误差统计

Tab. 4 Error statistics between the detailed model and
the equivalent model under the 1.2 pu high-voltage
ride-through condition with symmetrical fault at
20% load rate

指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 7	0.000 5	0.002 7	0.002 7
E2	0.000 0	0.000 7	0.000 5	0.002 7	0.002 7
E3	0.000 0	0.000 7	0.000 6	0.003 1	0.002 8
E4	0.000 0	0.001 4	0.000 7	0.003 1	0.002 6
E5	0.000 0	0.001 4	0.000 7	0.003 2	0.002 7
E6	0.000 0	0.000 9	0.000 5	0.002 8	0.002 7
E7	0.000 0	0.000 7	0.000 6	0.002 7	0.002 7
E8	0.000 0	0.000 8	0.000 6	0.002 8	0.002 8
E9	0.000 0	0.001 1	0.000 6	0.003 0	0.002 7

3.2.2 不对称电压扰动工况对比分析

在不对称电压扰动工况下,为进一步验证所提等值方法的适用性,对光伏电站详细模型与等效模型的动态响应进行了对比分析。图 18 给出了 90% 与 20% 负载率下,详细模型与等效模型在不对称 1.2 pu 高电压穿越及 0.2 pu 低电压穿越工况下 35 kV 母线侧有功功率的对比结果。

由图 18 可知,在不对称电压扰动条件下,等效模型与详细模型在 35 kV 母线侧的有功功率变

化趋势仍然保持较高一致性。与对称扰动工况相比,不对称电压扰动会引入负序电压分量,使光伏电站输出功率在暂态过程中出现一定波动,因此该工况能够更加严格地检验等效模型对系统动态特性的保持能力。

表 5 对称故障 20% 负载率 0.2 pu 低电压穿越工况下
详细模型与等值模型误差统计

Tab. 5 Error statistics between the detailed model and
the equivalent model under the 0.2 pu low-voltage
ride-through condition with symmetrical fault at
20% load rate

指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 6	0.000 5	0.002 7	0.002 7
E2	0.000 0	0.000 6	0.000 5	0.002 7	0.002 7
E3	0.000 0	0.000 6	0.000 3	0.000 7	0.001 2
E4	0.000 0	0.000 5	0.000 4	0.000 2	0.001 1
E5	0.000 0	0.000 8	0.000 5	0.000 3	0.001 4
E6	0.000 0	0.004 1	0.001 8	0.005 4	0.006 0
E7	0.000 0	0.000 5	0.000 4	0.002 3	0.002 3
E8	0.000 0	0.000 9	0.000 7	0.003 9	0.003 9
E9	0.000 0	0.000 6	0.000 4	0.001 3	0.001 8

仿真结果表明,在典型工况 90% 与 20% 负载率下,等效模型均能够较好地反映详细模型在不对称低电压穿越及高电压穿越工况下的有功功率变化过程。尽管在暂态波动阶段两种模型之间存在一定差异,但其整体变化趋势、波动幅值及故障后恢复过程均较为接近。说明所提基于集电线路损耗一致原则的快速等值方法,在不对称电压扰动条件下同样具有较好的准确性和适用性。

同样参照光伏发电系统模型验证误差评价方法,对 35 kV 母线侧电压、电流、有功功率、无功功率及无功电流进行分区间误差统计,结果如表 6~9 所示。与对称电压扰动工况相比,不对称电压扰动会引入负序分量,使故障发生及恢复阶段的暂态波动更加明显,因此该工况能够更加严格地检验等值模型对场站端口动态特性的保持能力。由表 6~9 可知,在不对称电压扰动工况下,各评价量的 E1~E9 整体处于较小水平,说明所建等值模型能够较好保持详细模型在 35 kV 母线侧的端口动态外特性。

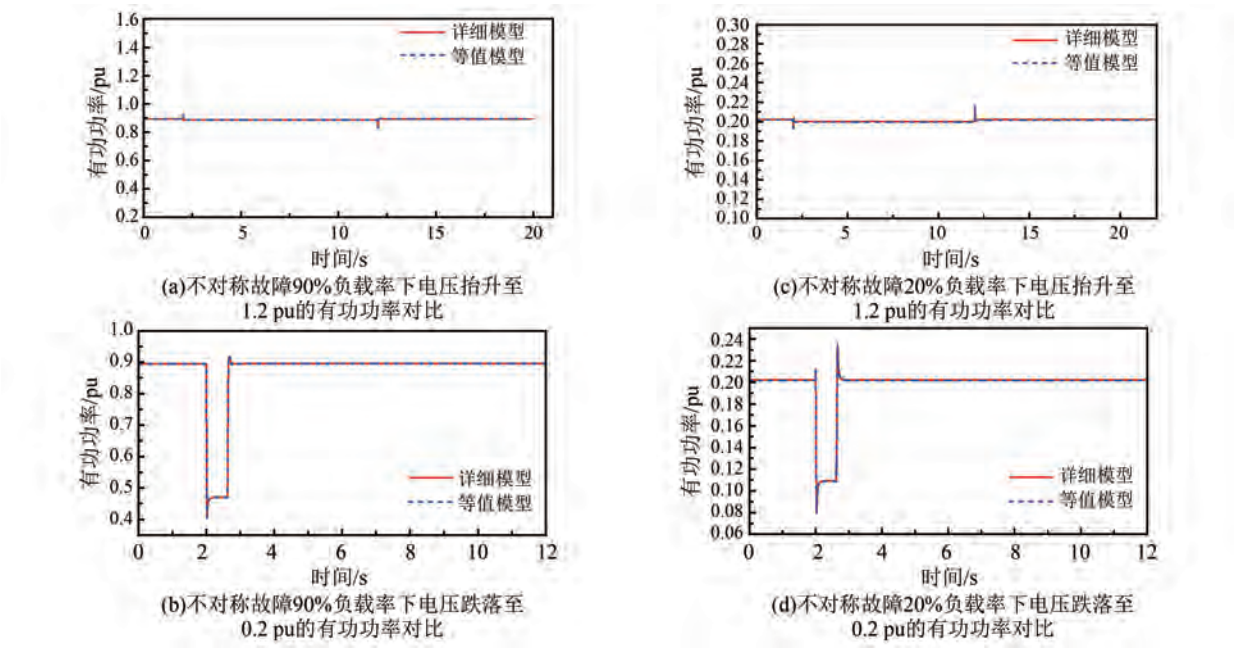


图 18 不对称故障下详细模型与等值模型 35 kV 母线侧有功功率对比

Fig. 18 Comparison of active power at the 35 kV bus side between the detailed model and the equivalent model under asymmetrical fault

表 6 不对称故障 90% 负载率 1.2 pu 高电压穿越工况下
详细模型与等值模型误差统计

Tab. 6 Error statistics between the detailed model and the equivalent model under the 1.2 pu high-voltage ride-through condition with asymmetrical fault at 90% load rate

指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E2	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E3	0.000 0	0.000 2	0.000 3	0.001 2	0.001 1
E4	0.000 0	0.000 2	0.000 4	0.001 1	0.001 0
E5	0.000 0	0.000 3	0.000 5	0.001 6	0.001 4
E6	0.000 0	0.000 3	0.000 4	0.000 9	0.000 9
E7	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 3	0.000 3
E8	0.000 0	0.000 4	0.000 4	0.000 4	0.000 4
E9	0.000 0	0.000 3	0.000 4	0.000 8	0.000 7

3.2.3 小结

综上,本文从对称电压扰动和不对称电压扰动两类工况出发,对详细模型与等值模型在 90% 和 20% 负载率、1.2 pu 高电压穿越和 0.2 pu 低电压穿越条件下的动态响应进行了对比验证。由 35 kV 母线侧有功功率曲线可以看出,等值模型能够较好

跟踪详细模型在故障发生、故障持续及故障恢复阶段的功率变化趋势。进一步结合表 2~9 的分区间误差统计结果可知,电压、电流、有功功率、无功功率及无功电流等评价量的 E1~E9 均处于表 1 国标给出的允许最大偏差值,说明所建等值模型不仅能够保持场站有功功率传输特性,也能够较好保持 35 kV 母线侧多电气量端口动态外特性。

表 7 不对称故障 90% 负载率 0.2 pu 低电压穿越工况下
详细模型与等值模型误差统计

Tab. 7 Error statistics between the detailed model and the equivalent model under the 0.2 pu low-voltage ride-through condition with asymmetrical fault at 90% load rate

指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E2	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E3	0.000 0	0.000 4	0.000 6	0.001 3	0.002 5
E4	0.000 0	0.000 2	0.000 7	0.002 3	0.004 9
E5	0.000 0	0.000 4	0.000 7	0.002 3	0.005 0
E6	0.000 0	0.000 5	0.000 5	0.000 6	0.000 9
E7	0.000 0	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 2
E8	0.000 0	0.000 4	0.000 4	0.000 3	0.000 3
E9	0.000 0	0.000 2	0.000 5	0.001 4	0.002 9

表 8 不对称故障 20% 负载率 1.2 pu 高电压穿越工况下
详细模型与等值模型误差统计

Tab. 8 Error statistics between the detailed model and
the equivalent model under the 1.2 pu high-voltage
ride-through condition with asymmetrical fault
at 20% load rate

指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 7	0.000 5	0.002 7	0.002 7
E2	0.000 0	0.000 7	0.000 5	0.002 7	0.002 7
E3	0.000 0	0.000 5	0.000 7	0.002 9	0.002 7
E4	0.000 0	0.000 7	0.000 6	0.002 7	0.002 4
E5	0.000 0	0.000 7	0.000 7	0.002 8	0.002 4
E6	0.000 0	0.000 9	0.000 7	0.002 7	0.002 5
E7	0.000 0	0.000 7	0.000 5	0.002 8	0.002 8
E8	0.000 0	0.001 0	0.000 6	0.002 9	0.002 9
E9	0.000 0	0.000 7	0.000 6	0.002 7	0.002 5

表 9 不对称故障 20% 负载率 0.2 pu 低电压穿越工况下
详细模型与等值模型误差统计

Tab. 9 Error statistics between the detailed model and
the equivalent model under the 0.2 pu low-voltage
ride-through condition with asymmetrical fault
at 20% load rate

指标	U_s	I	P	Q	I_q
E1	0.000 0	0.000 4	0.000 3	0.002 7	0.002 7
E2	0.000 0	0.000 4	0.000 3	0.002 7	0.002 7
E3	0.000 3	0.001 0	0.000 4	0.001 1	0.001 6
E4	0.000 3	0.001 1	0.000 3	0.000 2	0.000 8
E5	0.000 3	0.002 3	0.000 9	0.000 6	0.001 8
E6	0.000 1	0.000 7	0.000 5	0.002 4	0.002 4
E7	0.000 0	0.000 7	0.000 6	0.002 7	0.002 7
E8	0.000 0	0.001 2	0.001 1	0.002 8	0.002 8
E9	0.000 2	0.000 8	0.000 3	0.001 3	0.001 6

与对称电压扰动工况相比,不对称电压扰动下故障期间存在一定暂态波动,部分电气量误差相对增大,但整体误差仍保持在较小范围内,表明所提出基于集电线路损耗一致原则的等值方法在不同负载率、不同故障类型及不同电压扰动幅值下均具有较好的适用性。该结果进一步验证了光伏场站等值模型在降低模型规模和提高仿真效率的同时,能够保持与详细模型较为一致的端口动态响应特性。

4 结语

本文提出一种基于厂家黑盒模型的光伏机组 EMT 建模方法,所提方法能够在厂家控制细节不完全公开的条件下构建适用于工程仿真的光伏机组 EMT 模型,并能够在降低场站模型规模和提高仿真效率的同时保持 35 kV 母线侧端口动态外特性,为后续开展光伏场站并网安全稳定影响分析提供了有效的建模手段。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

胡靖丰进行了方案设计、模型建立、仿真分析、内容总结与论文撰写;陈众进行了研究指导,并参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Hu Jingfeng carried out the scheme design, model development, simulation analysis, content summary and paper writing. Chen Zhong provided research guidance and participated in the review and revision of the manuscript. All authors have read the last version of the paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 杨晓林,陈虹,袁琪,等. 基于潮流追踪的用户碳排放水平计算与评估方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 22-28.
Yang X L, Chen H, Yuan Q, et al. Calculation and evaluation method of user carbon emission level based on power flow tracking [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 22-28.

- [3] 吴彦伟, 姚刚, 王海全, 等. 基于能量共享的多微网协同优化调度[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 1-11.
Wu Y W, Yao G, Wang H Q, et al. Multi-microgrids cooperative optimal scheduling based on energy sharing [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 1-11.
- [4] 刘硕, 周旭, 李建林. 储能型开关升压光伏并网逆变器的研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 42-48.
Liu S, Zhou X, Li J L. Research on energy storage switched boost photovoltaic grid-connected inverter [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(1): 42-48.
- [5] 姜海洋, 杜尔顺, 金晨, 等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2101-2115.
Jiang H Y, Du E S, Jin C, et al. Optimal planning of multi-time scale energy storage capacity of cross-national interconnected power system with high proportion of clean energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2101-2115.
- [6] 刘志坚, 洪朝飞, 郭成, 等. 基于 WRLS-ARMAX 系统辨识的新能源电力系统惯量评估[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 84-93.
Liu Z J, Hong C F, Guo C, et al. Inertia estimation of new energy power system based on WRLS-ARMAX system identification [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 84-93.
- [7] 刘庆龙, 傅裕斌, 薄海旺, 等. 基于有源逆变的新型混合式低压侧宽幅调压方法研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 466-476.
Liu Q L, Fu Y B, Bo H W, et al. Research on a novel hybrid wide-range voltage regulation method on low-voltage side based on active inversion [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 466-476.
- [8] 张磊, 王凌谊, 赵爽, 等. 含高比例分布式光伏的主动配电网分区电压控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9): 1026-1038.
Zhang L, Wang L Y, Zhao S, et al. Active distribution network partition voltage control with high proportion of distributed photovoltaic [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 1026-1038.
- [9] 国家能源局. 国家能源局 2025 年第三季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2025-07-31). [2026-04-11]. <https://www.nea.gov.cn/20250731/83ffa46373ec42dd99e0e3271028c151/c.html>.
- [10] 张倩茅, 徐田丰, 董家盛, 等. 光伏逆变器低电压穿越控制与储能系统[J]. 电力电子技术, 2026, 60(2): 72-79.
Zhang Q M, Xu T F, Dong J S, et al. Photovoltaic inverter low voltage ride-through control and energy storage system [J]. Power Electronics, 2026, 60(2): 72-79.
- [11] 贾焦心, 杨添淇, 邓晓洋, 等. 故障穿越期间光伏机组直流电压动态响应机理及改进方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2230-2243.
Jia J X, Yang T Q, Deng X Y, et al. Influence mechanism of voltage dynamics of photovoltaic DC bus during fault ride-through and its improve strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2230-2243.
- [12] 徐式蕴, 王一鸣, 孙华东, 等. 国外新能源脱网事故对中国电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 1-8.
Xu S Y, Wang Y M, Sun H D, et al. Insights from renewable energy outage accidents abroad for secure and stable operation of power grids in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 1-8.
- [13] 刘琳, 刘浩芳, 朱艺颖, 等. 大规模光储接入的交直流电网稳定运行特性及提升措施仿真研究[J]. 电网技术, 2025, 49(12): 4927-4935.
Liu L, Liu H F, Zhu Y Y, et al. Simulation study on the stable operation characteristics and improvement measures of the power grid with large-scale photovoltaic power stations and energy storage stations [J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 4927-4935.
- [14] 陈磊, 郑燊聪, 郭瑶, 等. 基于惯量-阻尼动态调整的跟网-构网变流器并联系统暂态稳定控制方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9): 924-934.
Chen L, Zheng S C, Guo Y, et al. Transient stability control method for parallel system of grid-following and grid-forming converters based on dynamic adjustment of inertia-damping [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 924-934.
- [15] 吴彦伟, 姚刚, 张帆, 等. 基于时序综合电压-有功灵敏度的储能电源优化配置策略[J]. 电机与

- 控制应用, 2025, 52(11): 1170-1181.
- Wu Y W, Yao G, Zhang F, et al. Optimal configuration strategy of energy storage power source based on time-series comprehensive voltage-active power sensitivity [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(11): 1170-1181.
- [16] 孙浩, 张曼, 陈志刚, 等. 并网光伏发电系统的通用性机电暂态模型及其与电磁暂态模型的对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 128-133.
- Sun H, Zhang M, Chen Z G, et al. Comparative study on electromechanical and electromagnetic transient model for grid-connected photovoltaic power system [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 128-133.
- [17] 叶林, 施媛媛, 王启亨, 等. 面向暂态分析的分布式光伏集群多步分群与等值建模[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(14): 72-81.
- Ye L, Shi Y Y, Wang Q H, et al. Multi-step grouping and equivalent modeling of distributed photovoltaic clusters for transient analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 72-81.
- [18] 王诗雯, 刘飞, 刘沁怡, 等. 不对称故障下两级式光伏并网系统低电压穿越控制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 91-102.
- Wang S W, Liu F, Liu Q Y, et al. Low-voltage riding-through control strategy for two-staged grid-connected photovoltaic system under asymmetrical faults [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 91-102.
- [19] 黄显斌, 林达, 王慧芳, 等. 并网光伏系统低电压穿越策略综述[J]. 机电工程, 2016, 33(5): 589-594, 601.
- Huang X B, Lin D, Wang H F, et al. Review of low voltage ride through strategy in grid-connected photovoltaic system [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(5): 589-594, 601.
- [20] 邹时容, 卢有飞, 梁雪青, 等. 新型电力系统下多技术融合协同仿真中功率耦合接口研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(2): 90-98.
- Zou S R, Lu Y F, Liang X Q, et al. Research on power coupling interface in multi-technology fusion collaborative simulation under novel power system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 90-98.
- [21] 崔森, 郁舒雁. 基于 PSModel 的海上风电场全电磁暂态建模与仿真[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 262-273.
- Cui S, Yu S Y. Full electromagnetic transient modeling and simulation of offshore wind farm based on PSModel [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 262-273.
- [22] 刘星, 许建中. 基于粗-细粒度分割的光伏场站控制器等效建模方法[J]. 电网技术, 2026, 50(1): 251-260.
- Liu X, Xu J Z. Equivalent modeling method of photovoltaic station controller based on coarse-fine-grained segmentation [J]. Power System Technology, 2026, 50(1): 251-260.
- [23] 高泽, 张迪, 谭昊宇, 等. 配电网大规模分布式光伏暂态等值建模方法[J/OL]. 现代电力: 2026-03-21. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2024.0182>.
- Gao Z, Zhang D, Tan H Y, et al. Transient equivalent modeling method for large-scale distributed photovoltaic systems in distribution networks[J/OL]. Modern Electric Power: 2026-03-21. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2024.0182>.
- [24] Sánchez-Muñoz D, Pérez-González E, Piñeros J F, et al. Simplified inverter-based generation model for protection and short-term stability studies in electromagnetic transient resolution [J]. Tecnológicas, 2022, 25(55): e2347.
- [25] Patsalides M, Efthymiou V, Stavrou A, et al. A generic transient PV system model for power quality studies [J]. Renewable Energy, 2016, 89: 526-542.
- [26] Al-Shetwi A Q, Sujod M Z, Blaabjerg F, et al. Fault ride-through control of grid-connected photovoltaic power plants: A review [J]. Solar Energy, 2019, 180: 340-350.
- [27] 戴志辉, 栾琨, 吴桐, 等. 多光伏电源两阶段式故障穿越协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(1): 243-254.
- Dai Z H, Luan K, Wu T, et al. Multi-photovoltaic two-stage fault ride-through coordinated control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(1): 243-254.
- [28] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964-

- 2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system; GB/T 19964—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [29] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- Zhang X, Cao R X. Solar Photovoltaic Grid-Connected Power Generation and Its Inverter Control [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [30] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电系统模型及参数测试规程: GB/T 32892-2026 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2026.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Model and parameter test regulation for photovoltaic power system; GB/T 32892—2026 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2026.
-
- 收稿日期:2026-04-16
收到修改稿日期:2026-07-03
作者简介:
胡靖丰(2001—),男,硕士研究生,研究方向为新能源并网,1592817966@qq.com;
* 通信作者:陈 众(1974—),男,博士,副教授,研究方向为电力系统运行与控制,2459100334@qq.com。