

计及动态响应特性的广域多源异构无功资源聚合建模方法

丁苍壁^{1*}, 郑晨一²

¹南京航空航天大学自动化学院 江苏南京

²南京林业大学信息科学技术学院、人工智能学院 江苏南京

【摘要】新型电力系统的受端电网中新能源、电力电子设备及多元负荷将广泛接入, 令无功资源呈现类型多样、分布广泛和动态响应差异明显等特征, 传统聚合方法难以准确描述扰动过程中的动态无功支撑能力。因此, 本文提出一种计及动态响应特性的广域多源异构无功资源聚合建模方法。首先, 根据无功功率特性、动态响应机理及控制方式, 将无功资源划分为电力电子型、旋转型、静态负荷、电力电子型负荷和动态负荷五类, 并利用无功贡献系数构建聚合模型。其次, 采用轨迹灵敏度分析筛选影响电压动态响应的关键参数, 降低参数辨识维度, 结合改进量子粒子群优化算法完成参数辨识。最后, EPRI-36 节点系统及实际受端电网算例表明, 所提方法能够较准确地表征电压扰动及恢复阶段的动态响应, 提高聚合模型与详细模型的一致性, 可为大电网机电暂态仿真和电压稳定分析提供模型支撑。

【关键词】无功资源; 聚合建模; 动态响应特性; 轨迹灵敏度; 参数辨识

【收稿日期】2026 年 5 月 15 日

【出刊日期】2026 年 6 月 20 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20260013

Aggregation modeling method for wide-area multi-source heterogeneous reactive power resources considering dynamic response characteristics

Cangbi Ding^{1*}, Chenyi Zheng²

¹College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu

²College of Information Science and Technology & Artificial Intelligence, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】In the receiving-end grids of new-type power systems, renewable energy sources, power electronic equipment, and diversified loads are expected to be extensively integrated, resulting in reactive power resources characterized by diverse types, wide spatial distribution, and significant differences in dynamic responses. Traditional aggregation methods have difficulty accurately representing the dynamic reactive power support capability during disturbances. Therefore, an aggregation modeling method for wide-area multi-source heterogeneous reactive power resources considering dynamic response characteristics is proposed. First, according to reactive power characteristics, dynamic response mechanisms, and control modes, reactive power resources are classified into five categories: power electronic resources, rotating resources, static loads, power electronic loads, and dynamic loads. An aggregation model is then constructed using reactive power contribution. Second, trajectory sensitivity analysis is employed to identify the key parameters affecting voltage dynamic responses, thereby reducing the dimension of parameter identification. The model parameters are subsequently identified using an improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm. Finally, case studies based on the EPRI-36 bus system and an actual receiving-end power grid demonstrate that the proposed method can accurately represent the dynamic responses during voltage disturbance and recovery stages, improve the consistency between the aggregated model and the detailed model, and provide model support for electromechanical transient simulation and voltage stability analysis of large-scale power grids.

【Keywords】Reactive power resources; Aggregation modeling; Dynamic response characteristics; Trajectory sensitivity; Parameter identification

*通讯作者: 丁苍壁

引言

随着新型电力系统加快建设, 新能源、储能、电动汽车及多类型电力电子设备在电网中的接入规模持续扩大^[1-3], 受端系统中的无功资源逐渐呈现类型多样、空间分布广泛和动态响应差异显著等特征^[4-6]。同步发电机、调相机、静止无功补偿器、静止同步补偿器以及光伏逆变器、风电变流器、储能变流器等装置在无功调节机理、控制结构和响应速度方面存在明显差异。同时, 静态负荷、感应电动机和电力电子型负荷的无功消耗特性也会直接影响系统电压动态过程^[7-10]。在大规模电网仿真中, 若对各类装置均采用详细模型, 将显著增加模型规模和计算负担。因此, 构建兼顾动态响应精度与计算效率的聚合模型, 是准确开展受端系统电压稳定分析与无功协调控制的重要基础。

国内外针对无功资源建模及聚合方法已开展了较多研究。电磁暂态模型能够细致描述电力电子装置的开关过程、内部控制及快速电气响应, 在单体装置和局部系统动态特性分析中具有较高精度^[11-12], 但其模型阶数较高, 对仿真步长、设备参数和计算资源要求较大, 难以适应大电网、多场景和长时间尺度的统一仿真分析^[13-14]。机电暂态模型通过简化快速电磁过程, 能够在保留主要动态特性的同时提高仿真效率, 已广泛应用于电力系统规划、运行分析和稳定评估^[15]。

针对多类型装置的聚合建模, 已有研究主要采用容量加权、功率加权、参数等值和响应轨迹拟合等方法^[16]。容量与功率加权方法能够保持聚合前后的稳态功率平衡, 但难以反映不同控制模式和动态时间尺度的差异。参数等值方法通常依据同类装置参数的统计特征构建聚合模型, 其结果易受参数分布和运行状态变化影响^[17-18]。响应轨迹拟合方法以详细模型或实测数据为参照, 通过优化算法辨识聚合模型参数, 能够改善动态响应精度, 但多类型装置聚合模型包含较多控制参数, 直接开展全参数辨识容易造成计算维度增加、参数耦合增强和寻优效率下降^[19-20]。同时, 不同扰动场景下各参数对电压响应的影响程度存在差异, 缺乏关键参数筛选将进一步影响辨识结果的稳定性与适用性。

直流系统受端区域对无功资源的动态支撑能力具有较高依赖, 故障扰动后各类装置的无功响应将共同影响母线电压恢复特性^[21-23]。聚合模型若不能准确表征不同装置的动态行为, 可能导致电压响应过程、装置脱网状态及故障恢复路径的仿真结果出现偏差, 进而影响系统稳定水平评估和控制措施制定^[24-26]。华东电网某特高压直流双极闭锁事故后的仿真分析表明, 负

荷与无功资源模型难以准确复现受端区域电压动态变化, 限制了对故障影响及调控效果的准确判断^[27-28]。

现有聚合建模研究多面向单一类型设备或特定运行场景, 容量加权和参数等值方法主要保持聚合前后的稳态功率特性, 难以统一表征新能源、储能、常规电源及负荷等多类无功资源在控制方式和动态响应方面的差异。聚合模型包含较多稳态参数和控制参数, 直接开展全参数辨识容易增加计算复杂度, 而基于单一扰动场景获得的参数也难以兼顾不同运行状态下的动态适应性。因此, 亟需研究兼顾异构特性表征、参数辨识效率和多场景动态一致性的聚合建模方法。

针对现有方法的不足, 本文提出一种计及动态响应特性的广域多源异构无功资源聚合建模方法。不同于仅依据容量比例进行等值的传统方法, 本文从无功输出、无功消耗及其对系统电压动态过程的影响出发, 根据运行机理和控制特性对广域无功资源进行分类, 并选取典型设备模型构建统一聚合框架。进一步建立综合考虑电压、频率、有功功率和无功功率响应轨迹的灵敏度指标, 通过参数灵敏度排序及相邻灵敏度比值识别对模型外部动态特性具有主导作用的可辨参数, 实现聚合模型参数空间降维。在多类典型扰动场景下, 利用改进量子粒子群优化算法完成关键参数联合辨识, 使聚合模型能够兼顾不同电压动态过程的响应一致性。EPRI-36 (Electric Power Research Institute-36) 节点系统及实际受端电网算例用于验证所提方法的准确性、计算效率和大电网机电暂态仿真适用性。

1 研究框架

1.1 无功资源分类

本文所研究的广域多源异构无功资源是指无功输出、无功消耗或动态响应过程对系统无功平衡、无功分布及电压动态特性具有显著影响的各类电力设备与负荷, 主要包括具备无功调节能力的新能源场站、常规电源、储能系统和专用无功补偿装置, 以及静态负荷、感应电动机和电力电子型负荷等。根据无功功率特性、动态响应机理及控制方式, 将广域多源异构无功资源划分为电力电子型无功资源、旋转型无功资源、静态负荷、电力电子型负荷和动态负荷五类, 如图 1 所示。该分类能够反映不同资源在无功作用方式、控制结构和响应速度方面的差异, 为后续聚合模型构建与参数辨识提供基础。

由于同步发电机、水轮机、调相机等资源的物理结构和工作原理均依赖旋转运动来实现能量转换以及输出无功控制, 将此类旋转型的出力机组归纳为旋转型

无功资源;光伏电站、风电场、静止同步补偿器等装置均通过变流器或逆变器实现并网运行,可实现快速动态响应、双向无功调节、独立控制能力以及基于精确调节等功能,将此类电力电子型的设备归纳为电力电子型无功资源;电热设备、电抗器、老式照明设备等常规负荷所消耗的有功、无功功率与一般其端口电压和频率之间为代数方程关系,运行特性与所消耗无功呈现线性关系,可将其归纳为静态无功负荷;感应电动机、大型水泵、压缩机等设备具有时间动态特性,即无功功率随运行状态变化的特点,且受电压影响较大,可将其归纳为动态无功负荷;变频空调、电动汽车充电站、计算机服务器等装置的无功消耗具有可控性和动态性,此类无功资源所消耗或提供的无功功率取决于控制策略,并可快速响应电压变化,可将其归纳为电力电子型无功负荷。

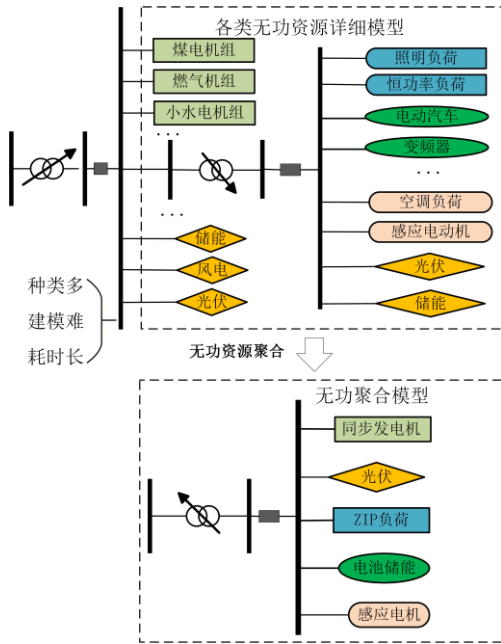


图1 广域多源异构无功资源聚合建模整体框架图

考虑各类无功资源的外部动态特性、机电暂态模型结构以及研究区域中的资源构成,选取光伏、同步发电机、ZIP负荷、电池储能和感应电机作为聚合模型中的典型模型单元。各模型分别表征电力电子接口设备、旋转设备、静态负荷、储能变流器设备和动态负荷的主要运行特性,重点保留其对系统电压和无功功率动态响应的影响。

现有的无功资源聚合建模方法主要依赖于经验公式或单一设备的测试数据,未能充分考虑多类型无功资源的动态特性和控制参数的灵敏度,导致模型精度受限。特别是在新能源占比逐步提高的背景下,无功资

源的时变特性及其对电网电压的影响日益显著,亟需一种能够兼顾不同无功资源运行特性、并能够自动优化关键参数的聚合建模方法。

1.2 典型模型无功贡献系数

各类无功资源的无功输出或消耗水平直接影响聚合模型的端口外特性。本文根据研究区域中的资源构成选取五个典型模型单元,并利用无功贡献系数描述各模型单元发出或消耗的无功功率与其容量之间的关系。式中各系数属于典型模型层面的聚合参数,用于表征相应模型单元对聚合模型无功功率及动态响应的贡献,其表达式如下:

$$\begin{cases} Q_{PV} = \alpha \times S_{PV_B} \\ Q_{SG} = \beta \times S_{SG_B} \\ Q_z = \gamma \times (Q_{bus} + S_{z_B}) \\ Q_{BESS} = \lambda \times S_{BESS_B} \\ Q_{IM} = \eta \times S_{IM_B} \end{cases} \quad (1)$$

式中 S_{PV_B} 、 S_{SG_B} 、 S_{z_B} 、 S_{BESS_B} 、 S_{IM_B} 分别为目标母线下光伏、同步发电机、ZIP负荷、电池储能和感应电机典型模型的等值容量; Q_{bus} 为目标母线下聚合阻抗所消耗的无功功率; α 、 β 、 γ 、 λ 、 η 分别为五个典型模型单元的无功贡献系数,用于反映各模型单元发出或消耗无功功率与其等值容量之间的关系。 Q_{PV_B} 、 Q_{SG_B} 、 Q_{z_B} 、 Q_{BESS_B} 、 Q_{IM_B} 分别为各典型模型单元发出或消耗的无功功率。

2 多源异构无功资源典型模型

2.1 静态负荷模型 ZIP

静态负荷指负荷的有功、无功功率与其端口电压、频率之间为代数方程关系,主要适用于电力系统潮流计算、无功规划和长期动态过程等长时间尺度场景,通常可以分为多项式模型 ZIP、幂函数模型和混合模型。机电暂态仿真平台中的静态负荷模型为 ZIP 模型,其表达式如下:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left[K_{pI} (V/V_0) + K_{pZ} (V/V_0)^2 + K_{pP} \right] (1 + P_f \Delta f) \\ Q &= Q_0 \left[K_{qI} (V/V_0) + K_{qZ} (V/V_0)^2 + K_{qQ} \right] (1 + Q_f \Delta f) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 K_{pZ} 、 K_{pI} 和 K_{pP} 分别为有功功率中的恒阻抗、恒电流和恒功率比例, K_{qZ} 、 K_{qI} 和 K_{qP} 分别为无功功率中的恒阻抗、恒电流和恒功率比例, P_f 和 Q_f 分别为有功功率和无功功率的频率响应系数。

2.2 三相感应电机模型 IM

三相感应电机聚合模型通常被用来模拟不同种类

的动态负荷, 如空调压缩机电机和容积泵、商用通风机、普通离心泵等旋转电机设备, 其聚合模型根据精细程度不同, 一般分为一阶、三阶和五阶模型, 以机电暂态仿真平台中的三阶模型为例, 相应的聚合电路如图。

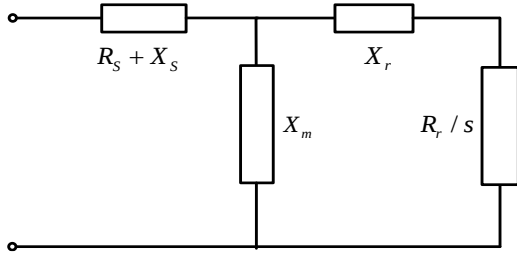


图2 三相感应电机聚合电路

在 abc 坐标系中写出其基本方程, 并变换至 dq0, 以暂态电势为状态量, 得到如下微分代数方程:

$$\begin{cases} U_d = R_s I_d + X I_q + E'_d \\ U_q = R_s I_q - X I_d + E'_q \\ T_j = (X_r + X_m) / R_r \\ X = X_s + X_m \\ X' = X_s + X_m / X_r \\ A\omega_0^2 + B\omega_0 + C = 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T_j} [E'_d - (X - X') I_q] - (\omega - 1) E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_j} [E'_q + (X - X') I_d] + (\omega - 1) E'_d \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C) T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \end{cases} \quad (4)$$

式中 R_s 为定子绕组电阻, R_r 为转子绕组电阻, X_r 为转子绕组漏抗, X_s 为定子绕组漏抗, X_m 为定转子的互感电抗, ω 为转速。

2.3 电池储能模型

电池储能模型与光伏模型相似, 由电池模型和换流器模型两部分组成, 其对电网机电暂态过程的主要影响也体现在换流器的并网特性上, 储能系统实际输出功率受换流器的容量限制, 且调控时通常有功优先于无功, 限制原则如下:

$$\begin{cases} |P| \leq I_{\max} V \\ |Q| \leq \sqrt{I_{\max}^2 V^2 - P^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中 V 为并网点电压, $I_{\max}$ 为换流器最大允许电流。

机电仿真平台中的电池储能模型总体结构及变流

器有功控制结构图如下:

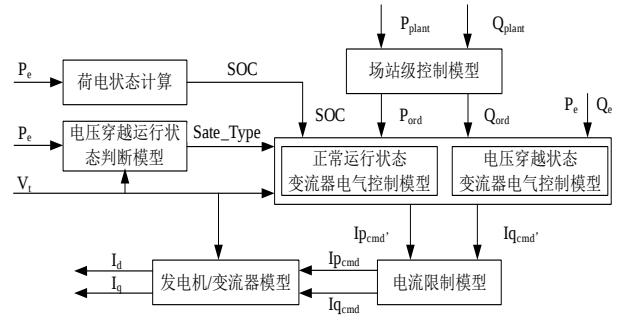


图3 储能电池仿真模型总体结构

观察上图易知, 该模型由场站级控制、荷电状态计算、电压穿越判断、正常运行和电压穿越变流器控制模型、电流限制环节、变流器等效模型几部分相互连接构成, 场站级控制与电压穿越控制模型与风机、光伏电站相同, 可分为开环控制和闭环 PI 控制两种模式; 荷电状态计算模型用来计算储能系统当前的储能状态, 变流器控制系统根据储能状态控制有功电流的输入和输出, 满电后不能再继续充电, 此时 I_{pmin} 为 0, 空电时不继续放电, I_{pmax} 为 0。

2.4 单级式光伏模型

光伏模型可以分为光伏电池阵列与逆变器模块。常规机电仿真平台中提供的单级式并网光伏模型是通过光伏阵列与电压源型逆变器经直流稳压电容相连, 逆变器将光伏阵列所发直流电转变为交流电, 经滤波电感与电网相连, 实现并网。

电池阵列可以理解为由最大功率点跟踪控制 (MPPT) 的直流侧端电压和四种技术参数、环境温度、光照强度作为输入, 直流侧电流作为输出的代数方程模块, 其中环境温度、技术参数在小时时间尺度下为恒定值, 光伏阵列输出功率是光照强度和環境温度的函数, 其具体的表达式如下:

$$I_L = I_{SC} \left[1 - C_1 \left(\exp \frac{V}{C_2 V_{OC}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right) \exp \left(-\frac{V_m}{C_2 V_{OC}} \right) \\ C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{OC}} - 1 \right) \left[\ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

实际工程中, 光伏阵列厂家给定的 I_m , I_{SC} , V_m , V_{OC} 均为特定温度 (25°C)、特定光照 ($1000\text{W}/\text{M}^2$) 条件中的数值, 需要考虑实际情况对其进行修正, 修正公式如下:

$$\begin{cases} \Delta S = \frac{S}{1000} - 1 \\ \Delta T = T - 25 \\ I_{SCC} = I_{SC} \times \frac{S}{1000} \times (1 + 0.0025\Delta T) \\ I_{mm} = I_m \times \frac{S}{1000} \times (1 + 0.0025\Delta T) \\ V_{OCC} = V_{OC} (1 - 0.00288\Delta T) \times \ln(e + 0.5\Delta S) \\ V_{mm} = V_m (1 - 0.00288\Delta T) \times \ln(e + 0.5\Delta S) \end{cases} \quad (8)$$

仿真计算时, 光照强度由潮流计算得到的有功功率反向拟合获得初值。结合暂稳作业设置中的日照扰动实现其动态变化, 而温度在计算过程中保持不变。对于逆变器模型, 在机电暂态时间尺度下忽略功率器件的高频开关过程, 采用基波平均值模型描述其外部动态特性。光伏逆变器通过锁相环获取并网点电压相位, 并在同步旋转坐标系下采用外环与电流内环相结合的双闭环控制。外环根据直流电压、有功功率以及无功功率或功率因数指令生成有功和无功电流参考值, 电流内环跟踪相应指令, 实现有功电流与无功电流的解耦调节。本文算例采用固定功率因数控制模式, 无功功率指令随有功功率及功率因数给定变化。

逆变器与光伏阵列及交流系统的交互过程如下。最大功率点跟踪控制根据光照强度和直流侧运行状态生成相应指令, 直流电压控制环调节有功电流参考值, 无功功率或功率因数控制环生成无功电流参考值。锁相环提取并网点电压相位, 并据此建立同步旋转坐标系。两轴电流误差经电流内环调节后形成逆变器输出电压指令, 通过调制与滤波环节向电网注入相应电流, 并反馈至控制环节形成闭环控制。故障扰动期间, 有功与无功电流指令还受到逆变器最大允许电流及控制优先级的约束。

2.5 同步发电机模型

同步发电机电暂态模型采用五阶实用模型, 在 Park 模型基础上通过简化定子绕组暂态过程和线性化转速影响构建而成。该模型通过分离电磁暂态与机械暂态动态特性, 重点描述 d/q 轴电气方程与转子运动方程, 适用于电力系统参数辨识及稳定性分析。

电磁暂态方程中, d 轴动态由次暂态电势 E_q'' 和暂态电势 E_q' 主导, 其微分方程为:

$$\begin{cases} T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = Ku_{fd} - (X_d - X_d')i_d - E_q' \\ T_{d0}'' \frac{dE_q''}{dt} = E_q' - (X_d' - X_d'')i_d - E_q'' \\ + \frac{T_{d0}'}{T_{d0}''} [Ku_{fd} - (X_d - X_d')i_d - E_q'] \end{cases} \quad (9)$$

q 轴动态通过次暂态电势 E_d'' 表征:

$$T_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} = (X_q - X_q'')i_q - E_d' \quad (10)$$

机电暂态方程聚焦于转子运动特性, 通过功角 δ 和转速 ω 的动态变化反映机械-电磁能量交互:

$$\begin{cases} T_J \frac{d\omega}{dt} = T_M - T_e - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_b (\omega - 1) \end{cases} \quad (11)$$

式中 T_J 为惯性时间常数 (典型值: 火电机组 3~10 s, 水电机组 5~15 s), D 为阻尼系数, 一般取 0.5~2.0 p.u., T_M 和 T_e 分别为机械转矩与电磁转矩。

同步发电机五阶实用模型通过以下假设简化了原始 Park 方程: 首先忽略定子绕组暂态过程, 将定子电压微分方程降阶为代数方程; 其次假定转速波动对电磁转矩的影响可线性化处理, 规避了转速与电磁参数的非线性耦合效应。这些简化有效分离了电磁暂态与机电暂态过程, 在保留 d/q 轴阻尼绕组动态特性的同时, 显著降低了模型复杂度, 使其兼顾工程精度与计算效率, 特别适用于基于广域测量数据的参数辨识和电力系统机电暂态仿真分析。

模型通过功角 $\delta(t)$ 的动态轨迹刻画同步发电机与电网的交互稳定性。惯性响应特性由 T_J 主导, 反映转子动能缓冲作用; 阻尼特性通过 D 抑制转速振荡, 改善动态收敛性。d/q 轴暂态电抗 (X_d' , X_q'' 等) 表征磁场衰减过程, 典型值范围为 0.15~0.35 p.u., 直接影响短路电流幅值与暂态稳定性边界。

此模型通过解耦电磁与机械动态, 为电力系统暂态稳定分析提供了兼顾精度与计算效率的数学框架, 是参数辨识和动态仿真的重要工具。

3 聚合模型参数辨识方法

3.1 基于轨迹灵敏度的关键参数提取方法

所分类的各个无功资源聚合模型均是由多个控制组件构成的复杂控制系统, 若考虑所有组件参数对模型机电暂态过程外特性的影响, 其可调节参数将有 200 多个, 若同时辨识所有参数, 将大大增加算法的计算量, 降低寻优效率, 造成严重的维度灾问题。因此, 在根据不同场景对模型进行参数辨识之前, 需要针对具体场景分析各参数的灵敏度, 筛选出对模型外特性有影响的可辨识参数。算法运行时只调节可辨参数, 将不可辨参数设置为固定值, 从而降低参数空间维度, 增加计算效率。模型参数的时域轨迹灵敏度是指模型的动态响

应轨迹随该参数的变化程度, 即模型动态响应对其偏导数, 其表达式如下:

$$\frac{\partial O_i(\theta, t)}{\partial \theta_j} = \lim_{\Delta \theta_j \rightarrow 0} \frac{O_i(\theta_1, \dots, \theta_m, t) - O_i(\theta_1, \dots, \theta_m, t)}{2\Delta \theta_j} \quad (12)$$

式中 O_i 为模型第 i 个电气量的响应轨迹, θ_j 表示第 j 个参数的归一化数值, m 为参数空间维度, t 表示第 t 个采样点。

电力系统元件通常为复杂的非线性模型, 其不同运行场景、不同工作状态下的解析结构不同, 往往难以直接通过其解析式计算模型响应轨迹对各参数的偏导, 但可以采用数值差分结合仿真的方法, 在 θ_j 附近加以微小扰动, 近似地数值计算其偏导, 故在满足仿真模型积分精度的前提下, $\Delta \theta_j$ 越小, 计算出的灵敏度越真实。

由于不同的电气量动态响应轨迹数值规格不同, 如果直接计算加和, 会使灵敏度计算结果偏向规格大的量。因此, 在计算灵敏度前需要对各响应轨迹规格化, 故将上式改写为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [O_i(\theta, t)/O_{iN}]}{\partial \theta_j} \\ & \approx \frac{[O_i(\theta_1, \dots, \theta_m, t) - O_i(\theta_1, \dots, \theta_m, t)]/O_{iN}}{2\Delta \theta_j} \end{aligned} \quad (13)$$

式中 O_{iN} 为响应 i 的稳态值, $\Delta \theta_j$ 为一个极小的正实数, 一般取 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 。轨迹灵敏度采用中心差分法计算, 参数归一化后的差分步长取 0.001, 每次仅改变一个参数并保持其余参数不变。

在机电仿真计算过程中, 无功资源聚合模型可以看作输入为母线电压 U 、系统频率 f , 输出为有功 P 、无功 Q 的函数, 故以这四个状态变量的响应轨迹对各参数偏导的均值作为判断该参数对模型外特性影响大小的依据, 最终筛选指标灵敏度 S 为:

$$S_j = \frac{1}{4T_c} \sum_{t=1}^{T_c} \left(\left| \frac{\partial [P(\theta, t)/P_N]}{\partial \theta_j} \right| + \left| \frac{\partial [Q(\theta, t)/Q_N]}{\partial \theta_j} \right| + \left| \frac{\partial [U(\theta, t)/U_N]}{\partial \theta_j} \right| + \left| \frac{\partial [f(\theta, t)/f_N]}{\partial \theta_j} \right| \right) \quad (14)$$

式中 T_c 为仿真计算的总时长。

对模型的每个参数按所列出的指标灵敏度 S 为表达式在特定场景下计算灵敏度 S 后, 按从大到小顺序排列。筛去计算结果为零的参数, 计算相邻两参数的灵敏度比值, 以比值最大的位置为分界点, 左侧参数组选

定为可辨参数, 即辨识中不断修改其数值; 右侧参数组设置为固定值, 在辨识过程中则保持不变。

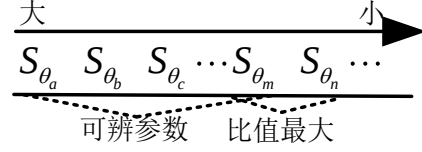


图4 可辨参数筛选规则

3.2 聚合模型关键参数辨识

为准确辨识出所筛选出的无功资源聚合模型主导参数, 需构建优化模型, 并设置以目标节点的电压和无功出力偏差最小的目标函数 F_d :

$$F_d = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \rho_1 \frac{|U_{eq} - U_{sim}|}{U_N} + \rho_2 \frac{|Q_{eq} - Q_{sim}|}{Q_N} \quad (15)$$

式中 L 为所设置典型场景的总个数; l 为第 l 个典型场景; U_{eq} 为无功资源聚合模型下目标节点的电压值; U_{sim} 为详细无功资源详细模型下目标节点的电压值; Q_{eq} 为无功资源聚合模型的无功功率输出值; Q_{sim} 为无功资源详细模型的无功功率输出值; ρ_1 、 ρ_2 分别为目标函数的权重系数, 本文均取 0.5。

此外, 还需要设计该优化模型的约束条件和收敛条件, 约束条件为无功资源聚合模型的待辨识参数应在可调范围内:

$$X_{li} \leq x_i \leq X_{hi} \quad (16)$$

式中 X_{li} 和 X_{hi} 分别为第 i 个待辨识参数可调范围的下限和上限; x_i 为第 i 个待辨识参数的数值。

收敛条件可分为两类, 第一类是强制收敛条件, 即优化算法迭代次数达到所设置的迭代次数上限:

$$n \geq N \quad (17)$$

式中 n 是当前优化算法迭代次数; N 是当前优化算法迭代次数所设置的上限。

第二类是迭代优化过程中目标函数所对应的适应度满足所设置的最小适应度要求:

$$F_{an} \leq F_{amin} \quad (18)$$

式中 F_{an} 是第 n 次优化迭代过程中所对应的目标函数适应度, F_{amin} 是满足优化结束条件下的所设置的目标函数适应度值。

根据上述所设置的以目标节点的电压和无功出力偏差最小作为目标函数的优化模型, 并结合相应的参数约束和收敛条件, 采用更有利于多目标求解的优化求解算法对无功资源聚合模型的待辨识参数进行求解,

最终得到需辨识参数较少、求解较易、建模较快、仿真精准的广域多源异构无功资源聚合模型。

4 仿真验证

本文算例均基于 PSASP (Power System Analysis Software Package) 平台开展仿真, 其中 EPRI-36 节点系统采用公开标准算例参数, 实际电网算例采用脱敏后的等值数据。并且除文中另有说明外, 仿真积分步长、数值求解方式及收敛判据均采用软件默认设置。

4.1 标准测试系统算例

EPRI-36 节点系统由 500kV 和 220kV 两种电压等级

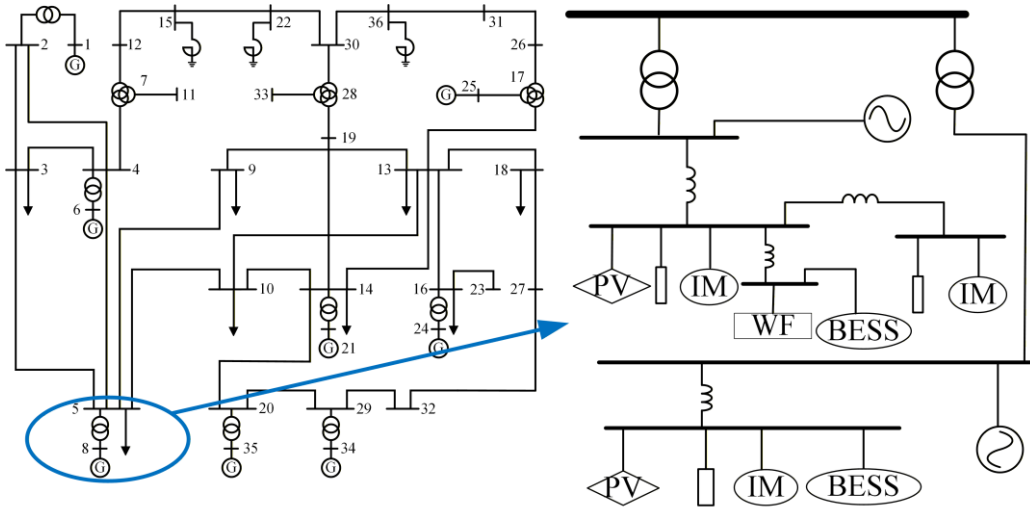


图 5 EPRI-36 节点系统拓扑图

基于所提出的无功资源聚合模型关键参数筛选方法, 在三种故障场景下计算系统中 5 号母线下综合负荷模型 200 多个可调参数的灵敏度。取 $\Delta\theta$ 为 0.001, 在该场景下逐一计算参数空间中各参数的数值灵敏度, 典型故障场景下对模型外特性有明显影响的参数包括 12 个稳态参数及 28 个动态参数。观察计算结果, 旋转型、电力电子型等设备的无功出力占比参数对母线电压波动的灵敏度值显著高于其他内部参数, 其灵敏度差异达到 8 倍以上, 部分聚合模型重要参数辨识结果如表 1 所示。

这一特性表明, 无功资源类型构成比例对系统暂态电压响应的主导作用远高于单一设备的内部控制参数。基于相邻参数灵敏度比值确定分界位置, 筛选出 12 个稳态参数与 28 个动态参数作为可辨识集, 大幅降低了模型复杂度。以单相断线故障为例, 初步聚合模型与详细模型的电压响应最大偏差为 0.15 p.u., 经关键参数筛选与参数辨识后, 最大电压偏差由 0.15 p.u. 降至 0.03 p.u., 验证了灵敏度驱动的降维机制的有效性。同样以这三种典型故障作为辨识场景来辨识所有可辨参数的

交流电网组成, 以 5 号母线下各类无功资源模型为分析对象, 旋转型无功补偿装置、电力电子型无功补偿装置、静态负荷、电力电子型负荷、动态负荷的容量分别为 220MVA、128MVA、34MVA、124MVA、136MVA。其拓扑结构如图 5 所示。

系统中其他无功资源参数保持不变, 在仿真时只更改 5 号无功资源模型的所有可调节参数。分别在系统中 BUS4 与 BUS5 之间交流线路中段、BUS10 与 BUS14 间交流线路靠近 BUS14 的 20% 处以及 Bus9 与 Bus13 间交流线路中段设置一次三相短路、A 相单相短路和单相断线故障。

典型值, 采用所提的改进 QPSO (Quantum-behaved Particle Swarm Optimization) 算法进行参数辨识, 参数灵敏度采用中心差分法计算, 归一化差分步长取 0.001; 改进 QPSO 的种群规模和最大迭代次数均设为 100, 收缩扩张因子固定取 0.6, 变异概率取 0.8。

表 1 部分聚合模型参数灵敏度计算结果

参数	调节范围	灵敏度	物理意义
α	[0, 1]	27.09	光伏系数
β	[0, 1]	27.35	常规电源系数
γ	[0, 1]	19.83	静态负荷系数
λ	[0, 1]	16.59	储能系数
η	[0, 1]	21.22	感应电机系数
K_{iv}	[0.25, 0.75]	1.219	电压环积分系数
K_{pz}	[0, 1]	2.712	无功恒阻抗占比
X_m	[3, 4]	3.295	激磁电抗
K_{p_lq}	[0.05, 0.1]	2.607	无功环比例系数

表 2 部分聚合模型参数辨识结果

参数名	真实值	辨识结果	相对误差
α	0.5	0.484	3.20%
β	0.5	0.521	4.20%
γ	0.5	0.519	3.80%
λ	0.5	0.478	4.40%
η	0.5	0.526	5.20%
K_{iv}	0.275	0.255	7.27%
K_{pz}	0.438	0.350	20.09%
X_m	3.132	3.173	1.31%
$K_{p,lq}$	0.096	0.1	4.17%
X_l	0.0078	0.0081	3.85%
K_l	2.73	2.914	6.74%
X_s	0.431	0.413	4.18%
$K_{p,lp}$	0.096	0.089	7.29%

改进 QPSO 算法能够完成聚合模型参数辨识, 部分参数辨识结果如表 2 所示。不同参数的辨识误差与其轨迹灵敏度和参数耦合程度有关, 因此需要结合参数误差及聚合模型外部响应轨迹对辨识效果进行综合评价。该表中灵敏度远高于其他参数的无功资源构成 α 、 β 、 γ 、 λ 、 η , 相对误差为 3.20%至 5.20%, 这是由于其对于模型动态响应曲线的影响更大, 算法在参数空间的探索过程中, 在这五个参数上越靠近实际值, 使目标函数值降低得越明显。此外五类无功占比参数的相对误差均低于 6%。需要说明的是, 聚合建模的主要目标是保持端口动态特性, 而非完全恢复各内部参数的真实值。

图 6 对比了详细模型、容量加权模型与所提聚合模型在稳定、临界稳定及失稳三类工况下的电压响应。稳定工况下, 所提模型与详细模型在故障前后的变化趋势基本一致, 恢复阶段电压偏差约为 0.01~0.02 p.u., 容量加权模型偏差约为 0.03~0.04 p.u., 对应平均相对偏差分别为 2.06%和 4.28%, 表明所提模型能够较准确地保持详细模型的稳态运行点及故障恢复特性。

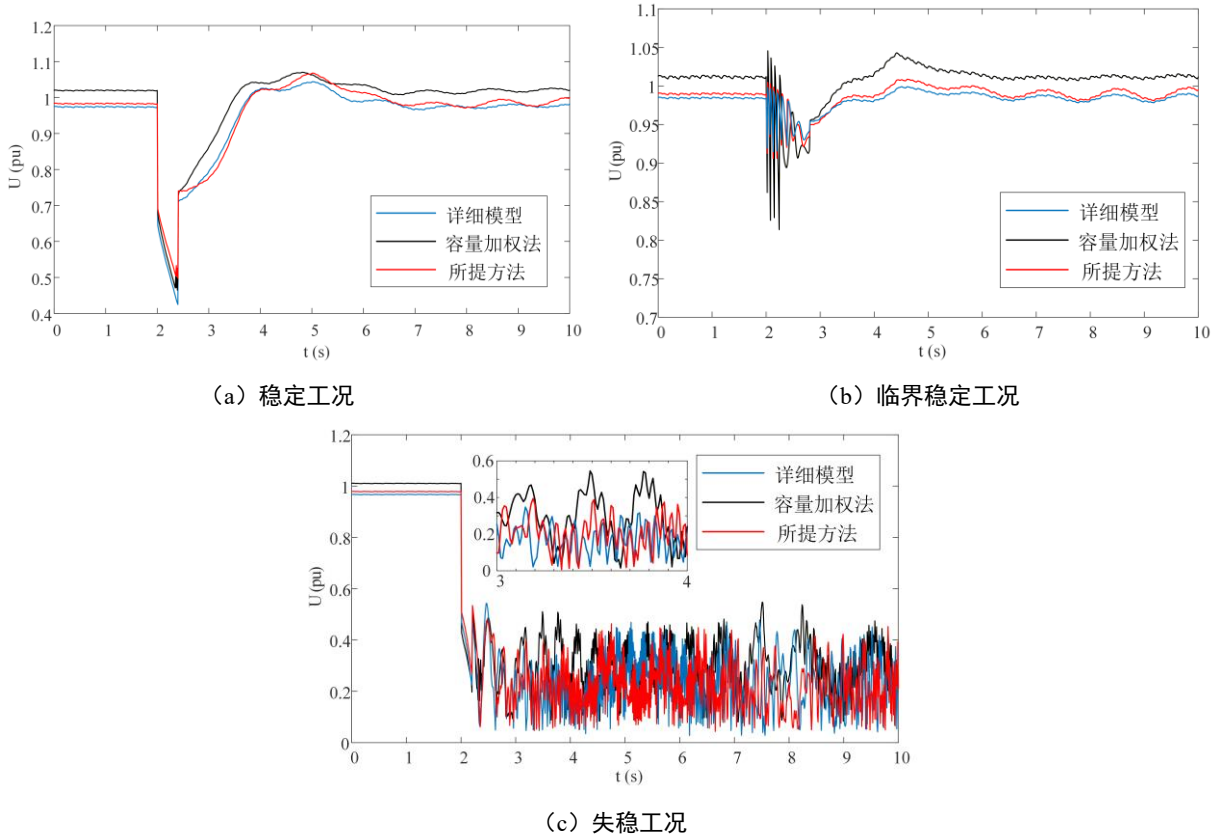


图 6 聚合模型运行曲线对比分析

临界稳定工况下, 容量加权模型故障后的最低电压为 0.82 p.u., 所提模型与详细模型均为 0.90 p.u.; 恢

复阶段容量加权模型出现 1.04 p.u. 的电压过冲, 而所提模型基本维持在 0.99~1.00 p.u. 之间。而在失稳工况下,

容量加权模型在 3~4 s 期间的电压振荡上包络约为 0.50~0.55 p.u., 所提模型为 0.43~0.45 p.u., 更加接近详细模型约 0.40 p.u. 的变化范围, 说明所提方法在暂态极值及失稳演化过程中的表征精度更高。

综合稳态值、暂态极值、恢复过程和振荡幅值估算, 所提模型相对详细模型的总体电压响应偏差率约为 5.6%, 容量加权模型约为 14.8%, 总体偏差降低约 62%。同时, 所提模型仿真耗时减少 18%, 折算后等效计算速度提高约 22%。因此, 所提方法能够在提高稳态及暂态动态响应精度的同时降低仿真计算负担, 实现聚合模型动态保真度与计算效率的兼顾。

4.2 实际电网算例

为验证所提聚合模型在实际复杂电网中的适用性, 研究基于华中电网某典型网架开展工程化仿真验证。该区域作为特高压直流工程的受端近区, A1 作为该地区的 220kV 变电站, 其汇集了容量为 262MW 的风电集群、154MW 的光伏电站、100MVar 调相机组以及 150MW 的小型火电机组, 并包含感应电机、空调负荷等动态无功需求, 其多源异构特征与高比例新能源渗透率具有显著代表性, 相应的运行参数如表 3 所示。通过设置特高压交流线路短路故障与直流单极闭锁两类典型扰动, 即对应本地电压失稳和通道电压波动, 采用本文所提的聚合方法对典型参数进行辨识, 其结果如表 4 所示, 而图 7 对比分析了所提模型与传统物理聚合方法在本地电压失稳和通道电压波动场景下的动态响应特性。

表 3 A1 变电站下的详细无功资源相关系数统计

资源类型	额定容量 (MVA)	真实系数
光伏 1	134	0.25
光伏 2	20	0.25
风电 1	162	0.3
风电 2	100	0.3
调相机 1	100	0.5
小火电 1	150	0.5
ZIP 负荷 1	12	0.6
ZIP 负荷 2	16	0.8
感应电机 1	50	0.5
感应电机 2	50	0.4
电力电子负荷 1	42	0.8
电力电子负荷 2	30	0.75
电力电子负荷 3	55	0.6

表 4 A1 变电站聚合模型关键参数辨识结果

参数名	辨识结果	参数名	辨识结果
α	0.28	K_{iv}	0.26
β	0.72	K_{pZ}	0.41
γ	0.77	X_m	2.97
η	0.43	$K_{p,lq}$	0.088
λ	0.74	K_l	2.05

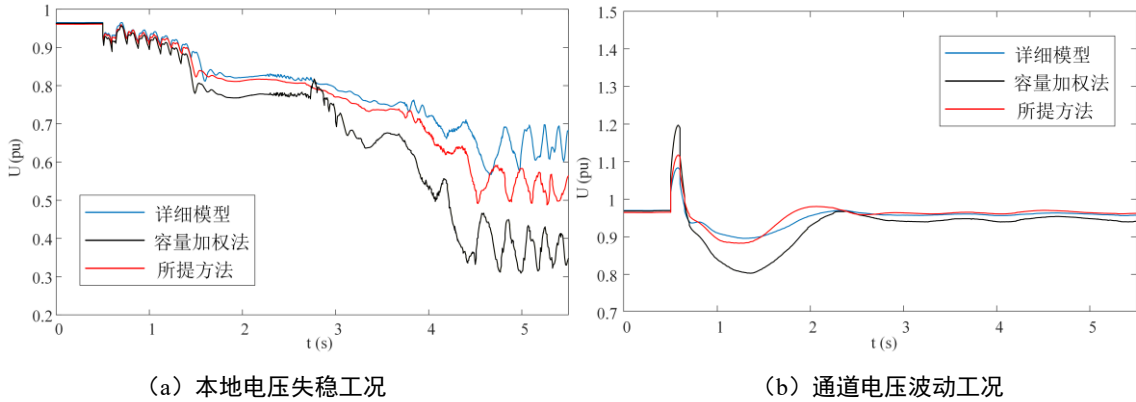


图 7 两类典型扰动场景下的电压响应对比

图 7 (a) 表明, 在本地电压失稳工况下, 扰动初期三种模型的变化趋势较为接近, 但随着电压持续下降, 容量加权模型与详细模型的偏差逐渐增大。第 5 s 时, 详细模型、所提模型和容量加权模型的代表性电压分别约为 0.64、0.54 和 0.37 p.u., 所提模型与详细模型

的偏差为 0.10 p.u., 相对偏差 16%; 容量加权模型偏差为 0.27 p.u., 相对偏差 42%, 所提方法使该阶段的电压响应偏差降低约 63%。

图 7 (b) 中, 直流单极闭锁后关键节点出现明显的暂态电压波动。详细模型的暂态峰值为 1.08 p.u., 所

提模型约为 1.11 p.u., 峰值相对偏差为 2.8%; 容量加权模型峰值为 1.20 p.u., 相对偏差为 11.1%, 所提方法使峰值响应偏差降低约 75%。在随后电压低谷阶段, 详细模型与所提模型最低电压均为 0.89 p.u., 容量加权模型则下降至 0.81 p.u.; 2.2 s 后, 所提模型恢复至 0.96 p.u., 并与详细模型基本一致。

综合本地电压失稳及通道电压波动场景, 所提模型对典型动态特征的响应偏差较容量加权模型降低约 63%~75%。结果表明, 所提模型不仅能够较准确地表征电压峰值、低谷和恢复过程, 在深度电压跌落及持续失稳条件下仍能较好跟踪详细模型的变化趋势, 验证了所提聚合方法在实际受端电网复杂扰动场景下的适用性和有效性。

5 结论

针对广域多源异构无功资源动态特性差异显著、详细模型仿真规模较大以及聚合模型参数辨识维度较高的问题, 本文提出一种计及动态响应特性的聚合建模方法, 通过分类建模、关键参数筛选和参数辨识, 实现多类型无功资源动态特性的统一表征。主要结论如下:

(1) 依据无功功率特性、动态响应机理及控制方式, 将无功资源划分为电力电子型无功资源、旋转型无功资源、静态负荷、电力电子型负荷和动态负荷五类, 并利用无功贡献系数表征不同类型装置在聚合模型中的无功贡献, 为广域多类型装置统一建模提供基础。

(2) 轨迹灵敏度分析可量化参数对母线电压动态响应的影响, 筛选关键参数, 减少待辨识参数数量和计算规模, 提高聚合模型参数辨识效率, 并为电网规划校核、运行方式分析及批量故障计算提供模型支撑。

(3) 改进量子粒子群优化算法能够完成聚合模型参数辨识, 所提模型在故障扰动及恢复阶段的电压响应与详细模型具有较高一致性。EPRI-36 节点系统和实际受端电网算例表明, 所提模型能够较准确地表征故障期间及恢复阶段的电压动态响应。

所提方法兼顾了聚合模型动态响应精度和大电网机电暂态仿真效率, 可为受端系统电压稳定分析提供模型支撑。后续将研究不同运行方式下聚合模型参数的自适应更新方法。

参考文献

[1] 葛辉, 王雯雯, 孙浩冉, 等. 考虑电动汽车用户成本最优的聚合商主从博弈充放电策略研究[J]. 电气工程与自动化, 2025; 4: (4): 1-12.

[2] T. Ding, S. Liu, W. Yuan, Z. Bie and B. Zeng, "A Two-Stage Robust Reactive Power Optimization Considering Uncertain Wind Power Integration in Active Distribution Networks," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol.7, No.1, Jan. 2016, pp. 301-311.

[3] 文云峰, 杨游航, 邢鹏翔, 等. 多维因素制约下新能源消纳能力评估方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 127-147.

[4] Y. Yamada, A. Tsusaka, T. Nanahara and K. Yukita, "A Study on Short-Circuit-Ratio for an Inverter-Based Resource With Power-Voltage Curves," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 39, No.4, July 2024, pp. 6076-6086.

[5] Y. Wang, D. Qiu, G. Strbac and Z. Gao, "Coordinated Electric Vehicle Active and Reactive Power Control for Active Distribution Networks," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 19, No.2, Feb. 2023, pp. 1611-1622.

[6] 何广飞, 大型工商业分布式光伏电站的电气设备选型与优化策略[J]. 电气工程与自动化, 2025; 4: (3): 101-104.

[7] S. Jung and G. Jang, "A Loss Minimization Method on a Reactive Power Supply Process for Wind Farm," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, No.4, July 2017, pp. 3060-3068.

[8] 石青松, 光储充一体化电站的容量配置与经济运行[J]. 电气工程与自动化, 2025; 4: (5): 93-95.

[9] D. Yang, X. Wang, F. Liu, K. Xin, Y. Liu and F. Blaabjerg, "Adaptive Reactive Power Control of PV Power Plants for Improved Power Transfer Capability Under Ultra-Weak Grid Conditions," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, No.2, March 2019, pp. 1269-1279.

[10] 张兴华, 鲁南, 王阳, 等. 新型电力系统下的负荷预测挑战与展望[J]. 电网技术, 2026, 50(6): 2231-2243.

[11] 许明旺, 顾伟, 章飞, 等. 含大规模电力电子变换器系统的电磁暂态分网解耦方法: 现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(10): 4195-4212.

[12] 王均, 光热电站熔盐储热系统的动态建模与控制优化[J]. 电气工程与自动化, 2025; 4: (7): 7-9.

[13] L. Shang, X. Dong, C. Liu and W. He, "Modelling and Analysis of Electromagnetic Time Scale Voltage Variation Affected by Power Electronic Interfaced Voltage Regulatory Devices," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, No.2, March 2022, pp. 1102-1112.

[14] 董毅峰, 王彦良, 韩估, 等. 电力系统高效电磁暂态仿真技术

- 综述[J].中国电机工程学报,2018,38(8):2213-2231+2532.
- [15] K. Ni, Y. Hu, C. Gan, C. Gong and H. Wen, "Synthetic Internal Voltage Phase-Amplitude Dynamics Investigation for Electric Drivetrain Small-Signal Model in Electromechanical Control Timescale for a Wound Rotor Induction Machine-Based Shipboard Power System," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 6, No.2, June 2020, pp. 844-855,
- [16] 左佳鑫,杨秀,赵晓莉,等.考虑 LVRT 功率特性的直驱永磁风电场多机聚合辨识等值建模方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(2):14-26.
- [17] Q. Shen, Y. Zhou, Q. Zhang, S. Maslennikov, X. Luo and P. Zhang, "Physics-Aware Neural Dynamic Equivalence of Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 39, No.1, Jan. 2024, pp. 2341-2344.
- [18] 邓俊,张阳,李怡然,等.基于高斯混合模型聚类的双馈风电场动态等值建模方法[J].太阳能学报,2024,45(1):342-350.
- [19] X. Meng et al., "Conversion and SISO Equivalence of Impedance Model of Single-Phase Converter in Electric Multiple Units," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 9, No.1, March 2023, pp. 1363-1378.
- [20] B. Wang et al., "Factor Screening for Equivalence Ratio Measurement Modeling: A Hybrid Approach Integrating Random Forest Algorithm and Support Vector Regression," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 74, 2025, pp. 1-11.
- [21] 夏楠,罗傲京,晁璞璞,等.基于故障穿越演化特性的 SVG 电磁暂态模型测辨方法[J].电力系统保护与控制,2024, 52(13):1-12.
- [22] 岳宗祖,申旭辉,严凤.多直流受端电网多无功装置协调控制优化方法[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(3):8-15.
- [23] 金一丁,于钊,李明节,等.新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J].电网技术,2018,42(7):2095-2102.
- [24] 李尚志,徐泰山,李英彪,等.构网型全功率风机并网系统机电尺度建模及动态稳定性分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2024,52(7):12-21.
- [25] 韩玉光, 面向高比例可再生能源接入的电力系统稳定性分析与控制[J]. 电气工程与自动化, 2025; 4: (3) : 49-51.
- [26] 吴国旻,宋新立,李霞,等.选择型直流输电控制系统实用机电暂态建模与参数校核方法[J].电网技术,2024,48(2):904-916.
- [27] 邵瑶,汤涌,郭小江,等.多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J].电网技术,2011,35(12):50-55.
- [28] 楼伯良,杨少杰,叶琳,等.大容量无功补偿装置在浙江受端电网的落点优选方法[J].广东电力,2019,32(10):96-101.
- 版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS