

引用格式:林涛,林政阳,李晨,等.基于TCN的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):169-177.
Citation: LIN Tao, LIN Zhengyang, LI Chen, et al. Small signal stability assessment of grid-connected system for grid-following/grid-forming hybrid new energy stations based on TCN[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 169-177.

基于TCN的跟网/构网混合型新能源场站 并网系统小干扰稳定性快速评估

林涛^{1,2}, 林政阳^{1,2}, 李晨^{1,2}, 李君^{1,2}

(1. 武汉大学交直流智能配电网湖北省工程技术研究中心, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:为支撑跟网/构网混合型新能源场站中机组控制方式快速切换,实现可适应电网强度变化的新能源场站安全稳定运行,提出基于时间卷积神经网络(temporal convolutional network, TCN)的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估方法。首先,构建跟网/构网混合型新能源场站聚合阻抗模型,通过特征值计算得到并网系统小干扰稳定裕度。然后,以并网系统短路比和新能源场站跟网/构网控制方式信息作为输入特征,以并网系统小干扰稳定裕度和阻尼比作为输出特征,训练TCN得到混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估模型。经过训练的模型可根据短路比和跟网/构网混合型新能源场站中各机组的控制方式快速输出对应的小干扰稳定裕度和阻尼比。最后,以一个含10台风电机组的新能源场站为对象进行算例分析。结果表明:所提TCN方法相比于长短期记忆神经网络方法,在小干扰稳定裕度和阻尼比预测上的平均绝对百分比误差分别降低16.76%、14.75%;所提方法的计算耗时相对于特征值计算方法降低98.54%,从而验证所提小干扰稳定性快速评估方法的准确性与时效性。

关键词:新能源场站;跟网型控制;构网型控制;小干扰稳定;时间卷积神经网络

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.020 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2024)04-0169-09

Small signal stability assessment of grid-connected system for grid-following/ grid-forming hybrid new energy stations based on TCN

LIN Tao^{1,2}, LIN Zhengyang^{1,2}, LI Chen^{1,2}, LI Jun^{1,2}

(1. Hubei Engineering and Technology Research Center for AC/DC Intelligent Distribution Network, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To support the rapid switching of unit control modes in grid-following/grid-forming hybrid new energy stations and achieve safe and stable operation of these stations that can adapt to changes in grid strength, a rapid assessment method for small-signal stability of grid-connected systems in grid-following/grid-forming hybrid new energy stations based on temporal convolutional network (TCN) is proposed. Specifically, an aggregated impedance model for grid-following/grid-forming hybrid new energy stations is constructed, and the small-signal stability margin of the grid-connected system is obtained through eigenvalue calculations. Furthermore, using the short-circuit ratio of the grid-connected system and the information on the grid-following/grid-forming control mode of the new energy station as input features, and the small-signal stability margin and damping ratio of the grid-connected system as output features, a TCN is trained to obtain a rapid assessment model for small-signal stability of grid-connected systems in hybrid new energy stations. The trained model can quickly output the corresponding small-signal stability margin and damping ratio based on the short-circuit ratio and the control mode of each unit in the grid-following/grid-forming hybrid new energy station. A case study is conducted using a new energy station with 10 wind turbines, and the results show that compared

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-97-XG)

通信作者: 林涛(1969—), 男, 博士, 博士生导师, 主要从事新型电力系统运行与控制等研究; E-mail: tlin@whu.edu.cn

to the long short-term memory neural network method, the proposed method reduces the mean absolute percentage error of small-signal stability margin prediction and damping ratio prediction by 16.76% and 14.75% respectively. Additionally, the computation time of the proposed method is reduced by 98.54% compared to the eigenvalue calculation method, verifying the accuracy and efficiency of the proposed rapid assessment method for small-signal stability.

Key words: new energy station; grid-following control; grid-forming control; small signal stability; time convolutional neural network

在“双碳”目标与新型电力系统建设的双重驱动下,2023年中国可再生能源发电总装机容量已突破14亿kW,占全国发电总装机容量比重超过50%,历史性超过火电装机容量^[1],而预计到2050年,中国可再生能源发电占总发电量比例将达到85%以上^[2]。随着高比例可再生能源的广泛接入,未来电网将逐步呈现出低短路比和弱电网强度的典型特征^[3]。

目前,新能源发电机组普遍采用跟网型控制方式,其在强电网下具有较高的动态性能和较强的稳定性,但采用跟网型控制方式的新能源机组不具备主动支撑能力并且难以在弱电网下稳定运行^[4]。构网型控制虽在弱电网强度下具有良好稳定性,但其在高电网强度时却存在低频振荡的风险^[5-6]。因此,构建跟网/构网控制方式协调互补,可有效适应电网强度变化的跟网/构网混合型新能源场站,这无疑是保障系统安全稳定运行的可行途径之一^[7-8]。

为探究混合型场站中各机组跟网/构网控制方式合理的配置比例,保障新能源场站的运行稳定性,国内外学者针对混合型场站中跟网/构网控制方式对系统稳定性的影响展开了相关研究。文献[9]基于阻抗分析法研究了跟网型控制风电场并网的次同步振荡问题,分析了风电场电气及控制参数对次同步振荡的影响;文献[10]对多台构网型控制新能源发电单元并联接入弱电网的稳定性进行了研究,结果表明,随着接入台数的增加,并网系统仍然具有良好运行稳定性;文献[11]对不同构网型风机比例下风电场所能稳定运行的临界等效短路比进行了探究;文献[12]为提升系统静态稳定性,探究了跟网型风机在系统中的比例配置极限,但并未考虑构网型控制方式;文献[13-14]针对短路比变化情况下,新能源场站跟网/构网控制方式改变对系统小干扰稳定性的影响进一步展开了优化分析。

然而,在展开混合型场站并网系统稳定性分析,进而制定各新能源机组最优的跟网/构网控制方式时,上述研究普遍采用了模型驱动的特征值计算方法,加剧了时间成本与计算负担。因此,难以

满足新能源场站在实际运行时对于控制方式切换的时效性要求。且随着新能源场站规模的增大,基于上述文献中普遍采用的特征值计算方法对新能源场站稳定性展开分析的时间成本将进一步加剧,使得控制方式制定的时效性问题进一步凸显。

近年来,数据驱动方法在电力系统中得到了广泛应用。文献[15]构建了风电一负荷数据驱动模型,有效地提高了调峰调度的计算速度;文献[16]采用残差图卷积深度神经网络对电网无功储备需求计算进行建模,大幅提升了无功储备计算速度;文献[17]将注意力机制引入卷积神经网络与门控循环单元中,有效提升了配网线路重过载预测的准确性。数据驱动方法对于海量数据具有较强的处理能力和较高的计算效率,为混合型新能源场站稳定性快速分析提供了可行方案^[18-19]。因此,有必要结合数据驱动方法,针对混合型新能源场站稳定性的准确、快速评估展开研究,进而为场站中新能源机组控制方式的快速切换提供参考。

鉴于此,本文提出基于时间卷积神经网络(temporal convolutional network, TCN)的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估方法。首先,构建跟网/构网混合型新能源场站聚合阻抗模型,通过特征值计算得到并网系统小干扰稳定裕度;然后,以并网系统短路比和新能源场站跟网/构网控制方式信息作为输入特征,以并网系统小干扰稳定裕度和阻尼比作为输出特征,训练TCN得到混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估模型。经过训练的模型可根据短路比和跟网/构网混合型新能源场站中各机组的控制方式快速输出对应的小干扰稳定裕度和阻尼比。最后,以一个含10台风电机组的新能源场站为对象,对所提小干扰稳定性快速评估方法的准确性与时效性进行分析验证。

1 跟网/构网混合型新能源场站并网系统阻抗模型构建

本文首先构建跟网、构网型新能源机组的阻抗

模型,并进一步建立混合型新能源场站与电网交互场景下的并网系统聚合阻抗模型。新能源场站内部的新能源发电机组均为直驱型风电机组(permanent magnet synchronous generator, PMSG)。

1.1 跟网型新能源机组小信号阻抗模型

含PMSG的跟网型新能源机组并网系统如图1所示, u_a 、 u_b 、 u_c 为并网点处三相电压, u_{ta} 、 u_{tb} 、 u_{tc} 为逆变器交流侧三相电压, i_{1a} 、 i_{1b} 、 i_{1c} 为交流侧三相电流, L_f 为滤波电感, R_g 为电网侧线路等效电阻, L_g 为电网侧等效电感。

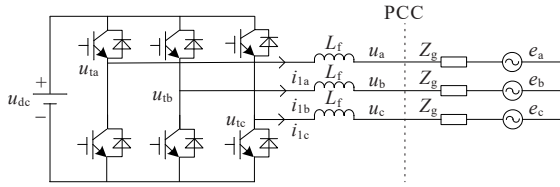


图1 跟网型控制新能源机组并网系统

Figure 1 Diagram of grid-connected system for grid-following new energy station

根据文献[20],逆变器在 dq 坐标系下主电路小信号阻抗模型表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{vd} \\ \Delta u_{vq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL_f & -\omega L_f \\ \omega L_f & sL_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, Δu_{vd} 、 Δu_{vq} 分别为小信号扰动下逆变器交流侧三相电压变化量的 d 、 q 轴分量; Δu_d 、 Δu_q 分别为小信号扰动下逆变器输出电压变换量的 d 、 q 轴分量; Δi_d 、 Δi_q 分别为小信号扰动下逆变器输出电流变化量的 d 、 q 轴分量。

根据式(1),主电路电流变化与并网点电压、逆变器端口电压扰动的关系矩阵表示如下:

$$G_{id}(s) = \begin{bmatrix} sL_f & -\omega L_f \\ \omega L_f & sL_f \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

针对锁相环阻抗模型展开分析,可以得出小扰动下锁相环相角偏差对交流侧电流和占空比的影响,表达式^[20](推导过程详见文献[21]附录A)为

$$G_{PLL}^i = \begin{bmatrix} 0 & I_{q10}^g G_{PLL}(s) \\ 0 & -I_{d10}^g G_{PLL}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G_{PLL}^d = \begin{bmatrix} 0 & D_{q0}^g G_{PLL}(s) \\ 0 & D_{d0}^g G_{PLL}(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, I_{d10}^g 、 I_{q10}^g 分别为交流侧电流静态工作点的 d 、 q 轴分量; D_{d0}^g 、 D_{q0}^g 分别为占空比静态工作点的 d 、 q 轴分量; G_{PLL} 为锁相环传递函数。

进一步,对考虑锁相环的电流环进行阻抗建模,电流环控制方程(推导过程详见文献[21]附录A)为

$$\begin{bmatrix} u_d^{\text{ref}} \\ u_q^{\text{ref}} \end{bmatrix} = G_{ci}(s) \begin{bmatrix} i_d^{\text{ref}} - i_d^c \\ i_q^{\text{ref}} - i_q^c \end{bmatrix} + G_{dei}(s) \begin{bmatrix} i_{1d}^c \\ i_{1q}^c \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, u_d^{ref} 、 u_q^{ref} 分别为电压 d 、 q 轴参考值; i_d^{ref} 、 i_q^{ref} 分别为电流 d 、 q 轴参考值; G_{ci} 为电流环的PI控制环节传递函数; G_{dei} 为解耦系数传递函数。

因此,综合考虑上述逆变器主电路、锁相环及电流环模型,得到跟网型控制风电机组阻抗模型:

$$Z_{WT_GFL} = (I_2 + G_{id}(G_{ci} - G_{dei})) \cdot \left\{ G_{id} \left[I_2 - ((-G_{ci} + G_{dei})G_{PLL}^i + G_{PLL}^d) \right] \right\}^{-1} \quad (6)$$

式中, I_2 为2阶的单位矩阵。

1.2 构网型新能源机组小信号阻抗模型

含PMSG的构网型新能源机组并网系统如图2所示;参考文献[22],其输出阻抗的小信号模型如图3所示。

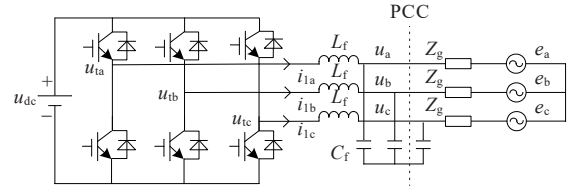


图2 构网型控制新能源机组并网系统

Figure 2 Diagram of grid-connected system for grid-forming new energy station

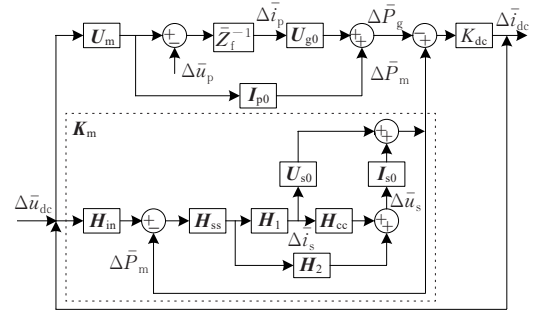


图3 构网型控制风电机组输出阻抗的小信号模型

Figure 3 Output impedance small-signal model of wind turbine

依据图3,可推导出图中传递函数 K_m 的表达式^[22](推导过程详见文献[21]附录B),即

$$K_m = [I_{s0}(H_2 + H_{cc}H_1)H_{ss} + U_{s0}H_1H_{ss}]^{-1} \cdot [I_{s0}(H_2 + H_{cc}H_1) + U_{s0}H_1]H_{ss}H_{in} \quad (7)$$

式中, K_m 为 $\Delta \bar{u}_{dc}$ 到 $\Delta \bar{P}_m$ 的传递函数; I_{s0} 、 U_{s0} 分别为机侧变换器交流侧电流、电压稳态值向量; H_1 、 H_2 、 H_{in} 、 H_{ss} 与 H_{cc} 均为传递函数矩阵。

进一步,基于网侧变换器交流侧电压 d 、 q 轴分量 $\Delta \bar{u}_{gd}$ 、 $\Delta \bar{u}_{gq}$ 与直流电压 $\Delta \bar{u}_{dc}$ 间的关系,可得传递函数矩阵 U_m ,具体表达式为

$$\Delta \bar{u}_{gd} = \bar{U}_g \Delta \bar{u}_{dc} \quad (8)$$

$$\Delta \bar{u}_{gq} = \bar{U}_g \Delta \delta = (\bar{U}_g \omega_{Bg} / s) \Delta \bar{u}_{dc} \quad (9)$$

$$U_m = \begin{bmatrix} \bar{U}_g \\ \bar{U}_g \omega_{Bg} / s \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, U_m 为直流电压到网侧变换器交流侧电压向量的传递函数矩阵。

\bar{Z}_f 为电感 \bar{L}_f 的传递函数矩阵, 可写为

$$\bar{Z}_f = \begin{bmatrix} s\bar{L}_f / \omega_{Bg} & -\bar{L}_f \\ \bar{L}_f & s\bar{L}_f / \omega_{Bg} \end{bmatrix} \quad (11)$$

对网侧变换器输出功率线性化, 具体如下:

$$\Delta \bar{P}_g = [\bar{U}_{gd} \ \bar{U}_{gq}] \begin{bmatrix} \Delta \bar{i}_{pd} \\ \Delta \bar{i}_{pq} \end{bmatrix} + [\bar{I}_{pd} \ \bar{I}_{pq}] \begin{bmatrix} \Delta \bar{u}_{gd} \\ \Delta \bar{u}_{gq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, \bar{U}_{gd} 、 \bar{U}_{gq} 分别为机侧变换器交流侧电压稳态值的 d 、 q 轴分量; \bar{I}_{pd} 、 \bar{I}_{pq} 分别为机侧变换器交流侧电流稳态值的 d 、 q 轴分量。

基于式(12)可得传递函数矩阵 U_{g0} 、 I_{g0} , 分别为

$$U_{g0} = [\bar{U}_{gd} \ \bar{U}_{gq}] \quad (13)$$

$$I_{g0} = [\bar{I}_{pd} \ \bar{I}_{pq}] \quad (14)$$

直流电压 $\Delta \bar{u}_{dc}$ 与 $\Delta \bar{P}_m$ 、 $\Delta \bar{P}_g$ 之间的关系为

$$\Delta \bar{u}_{dc} = \frac{1}{2H_c s} (\Delta \bar{P}_m - \Delta \bar{P}_g) = K_{dc} (\Delta \bar{P}_m - \Delta \bar{P}_g) \quad (15)$$

式中, H_c 为直流侧电容的惯量时间常数; K_{dc} 为中间变量。

结合 K_m 与式(8)~(15), 构网型控制风电机组阻抗模型为

$$Z_{WT_GFM} = [U_m K_{dc} I_{p0} + (1 - K_{dc} K_m) I_2]^{-1} \cdot [(1 - K_{dc} K_m) \bar{Z}_f + U_m K_{dc} U_{g0} + U_m K_{dc} I_{p0} \bar{Z}_f] \quad (16)$$

1.3 跟网/构网混合型新能源场站并网系统聚合阻抗模型

对于具有 m 条馈线且每条馈线上沿距离均匀分布 n 台风电机组的新能源场站, 其等效阻抗示意图如图4所示。

以馈线1为例, 其聚合阻抗 Z_1 可写为

$$\begin{cases} Z_{1,n} = Z_{WT} + Z_L \\ Z_{1,n-1} = (Z_{1,n} + Z_{WT})^{-1} + Z_L \\ \dots \\ Z_{1,1} = (Z_{1,2} + Z_{WT})^{-1} + Z_L \\ Z_1 = Z_{1,1} \end{cases} \quad (17)$$

式中, Z_{WT} 为风电机组阻抗, 若该风电机组采用跟网型控制, 则 $Z_{WT} = Z_{WT_GFL}$, 若该风电机组采用构网型控制, 则 $Z_{WT} = Z_{WT_GFM}$; Z_L 为线路阻抗矩阵; $Z_{1,n}$ 为截止第1条馈线中第 n 个风电机组的聚合阻抗; Z_1 为

馈线1聚合阻抗。

基于式(17), 同样可求出馈线2, 3, ..., m 的聚合阻抗, 进而得到风电场的聚合阻抗 Z_{WF} , 具体如下:

$$\begin{cases} Z_{P,1} = Z_1^{-1} \\ Z_{P,2} = (Z_{P,1} + Z_2^{-1})^{-1} \\ \dots \\ Z_{P,m} = (Z_{P,m-1} + Z_m^{-1})^{-1} \\ Z_{WF} = Z_{P,m} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $Z_{P,m}$ 为截止第 m 条馈线的聚合阻抗; Z_{WF} 为风电场的聚合阻抗。

而在电网侧, 其阻抗矩阵可表示为

$$Z_g = \begin{bmatrix} R_g + sL_g & -\omega_0 L_g \\ \omega_0 L_g & R_g + sL_g \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, Z_g 为电网侧阻抗矩阵; R_g 、 L_g 分别为网侧电阻、电感; $\omega_0 = 2\pi f$, f 为系统频率。

整个新能源场站并网系统的总阻抗矩阵为

$$Z_{RES} = Z_{WF} + Z_g \quad (20)$$

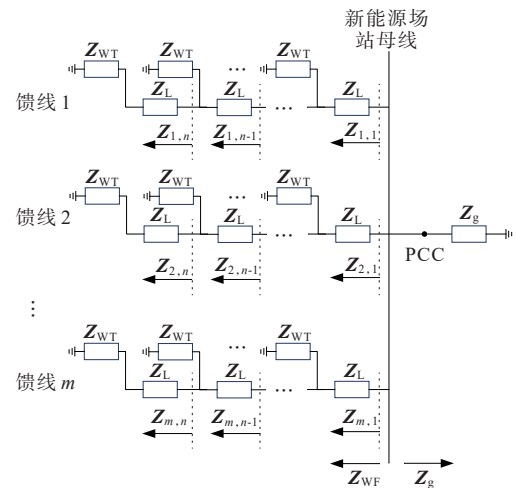


图4 新能源场站等效阻抗示意图

Figure 4 Equivalent impedance of new energy station

2 跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定裕度指标构建

本文基于新能源场站并网系统的特征值及阻尼比, 量化评估系统的小干扰稳定性和稳定裕度。

对于式(20)所示的新能源场站并网系统阻抗模型, 其特征方程可写为

$$\det(Z_{RES}) = \det(Z_{WF} + Z_g) = 0 \quad (21)$$

式中, $\det(\cdot)$ 为行列式计算。

基于式(21), 可以求出系统的闭环极点集合 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k]$, k 为闭环极点数, 进而得到对应的振

荡频率集合 $f=[f_1, f_2, \dots, f_k]$ 、阻尼比集合 $\zeta=[\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k]$ 。进一步地,以振荡频率为依据分别构建低频段和次/超同步频段的小干扰稳定裕度指标。

2.1 低频段小干扰稳定裕度指标

对于处于低频段的闭环极点,其对应的小干扰稳定判别标准定义为阻尼比大于 5%。因此,定义低频段的小干扰稳定裕度指标为

$$M_L = \min(\zeta_{L1}, \zeta_{L2}, \dots, \zeta_{Li}) - 0.05 \quad (22)$$

式中, $M_L \geq 0$ 则系统处于强阻尼状态; $M_L < 0$ 但 $\min(\zeta_{L1}, \zeta_{L2}, \dots, \zeta_{Li}) \geq 0$ 则系统处于弱阻尼状态; $M_L < 0$ 且 $\min(\zeta_{L1}, \zeta_{L2}, \dots, \zeta_{Li}) < 0$ 则系统处于不稳定状态; ζ_{Li} 为第 i 个低频段闭环极点对应阻尼比。

2.2 次/超同步频段小干扰稳定裕度指标

对于次/超同步频段,考虑阻尼比实质上反映的是振荡衰减到一定程度时所需的周波数,而无法直接反映其衰减时间;对于具有相同正阻尼比的振荡模式,其振荡频率越低,则振荡衰减到一定程度时所需的时间越长。因此,以衰减到一定程度的时间为标准,设置次/超同步频段的动态临界阻尼比^[23]。

对振荡模式 $\lambda = \sigma + j\omega$, 其阻尼比计算模型为

$$\zeta = -\sigma / \sqrt{\sigma^2 + \omega^2} \quad (23)$$

式中, ζ 为阻尼比; σ 、 ω 分别为特征根实部、虚部。

参考文献[23], 振荡振幅衰减到初值的 ϵ 倍所需的时间为

$$t = -(\ln \epsilon) / \sigma \quad (24)$$

基于式(23)、(24), 时间 t 可进一步表示为

$$t = -\frac{\ln \epsilon}{2\pi f} \sqrt{\frac{1 - \zeta^2}{\zeta^2}} \quad (25)$$

由式(25)可知, 在 $f_{LFO} = 2.5$ Hz、阻尼比阈值为 5% 的振荡模式下, 振幅衰减到初值的 ϵ 倍所需的时间为

$$\begin{cases} t = -(b \ln \epsilon) / 2\pi f_{LFO} \\ b = \sqrt{(1 - \zeta_{LFO}^2) / \zeta_{LFO}^2} \end{cases} \quad (26)$$

将式(26)代入式(23)、(24)可得, 对于振荡频率为 f 的振荡模式, 其动态临界阻尼比为

$$\zeta_D = 1 / \sqrt{(b/f_{LFO})^2 \cdot f^2 + 1} \quad (27)$$

对于次/超同步频段的振荡模式, 其阻尼比应大于对应的动态临界阻尼比。因此, 定义次/超同步频段的小干扰稳定裕度指标为

$$M_S = \min(\zeta_{S1} - \zeta_{D1}, \zeta_{S2} - \zeta_{D2}, \dots, \zeta_{Sj} - \zeta_{Dj}) \quad (28)$$

式中, $M_S \geq 0$ 则系统处于强阻尼状态; $M_S < 0$ 但 M_S 对应的阻尼比 $\zeta_s \geq 0$ 则系统处于弱阻尼状态; $M_S < 0$

且 M_S 对应的阻尼比 $\zeta_s < 0$ 则系统处于不稳定状态; ζ_{Sj} 、 ζ_{Dj} 分别为第 j 个次/超同步频段闭环极点对应阻尼比、动态临界阻尼比。

3 基于 TCN 的小干扰稳定性快速评估方法

基于式(21)所示的特征方程, 采用特征值计算方法求解新能源场站并网系统小干扰稳定裕度需耗费大量时间成本; 随着新能源场站规模的增加, 其特征方程复杂度也随之提升, 将进一步加剧特征方程求解难度, 增加计算耗时。因此, 特征值计算方法已难以满足当前混合型新能源场站中机组跟网/构网型控制在线切换的时效性要求, 有必要结合深度学习方法, 针对混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估展开进一步研究。

TCN 是在 2018 年提出的一种新型深度学习模型, 不仅可用于处理时序数据, 同样也可用于处理非时序数据。TCN 的核心单元为残差网络, 具体包括因果扩张卷积、权重归一化、激活函数以及正则化四部分。TCN 模型结构如图 5 所示, TCN 计算模型详见文献[24-26]。

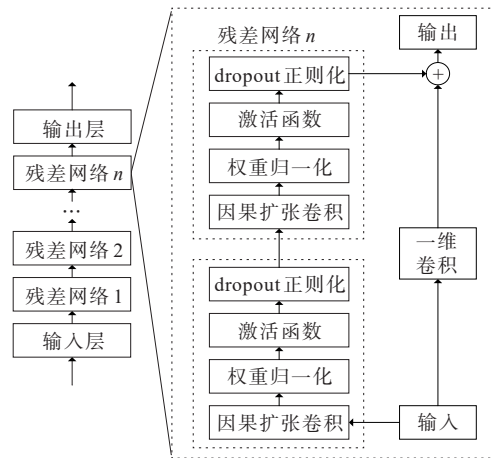


图 5 TCN 模型结构

Figure 5 Structure of TCN model

相比于基于顺序处理的门控循环单元 (gated recurrent unit, GRU)、长短期记忆神经网络 (long short-term memory, LSTM) 等循环神经网络, TCN 的结构允许并行计算。这使得 TCN 在处理大规模数据时能够加速训练和推理过程, 有效提升了 TCN 对于大规模样本数据的处理时效性。因此, TCN 适用于存在海量数据信息的混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估。

考虑新能源场站中机组跟网/构网的控制模式将影响新能源场站侧阻抗 Z_{WF} , 而短路比则影响电

网侧阻抗 Z_g , 进而影响整个新能源场站并网系统的小干扰稳定性。因此, 考虑将新能源机组跟网/构网的控制模式与短路比作为 TCN 模型训练的输入特征样本; 将新能源场站并网系统的小干扰稳定裕度与阻尼比作为 TCN 模型训练输出特征样本, 构建基于 TCN 的小干扰稳定性快速评估模型。基于大量历史样本数据, 训练得到“新能源场站机组跟网/构网控制模式”+“短路比”到“小干扰稳定裕度”+“阻尼比”的端到端直接映射模型, 具体可写为

$$\mathbf{y} = f_{\text{TCN}}(\mathbf{x}_{\text{NPES}}) \quad (29)$$

式中, \mathbf{y} 为 TCN 模型的输出向量, 包括小干扰稳定裕度和阻尼比; f_{TCN} 代表训练的 TCN 模型; \mathbf{x}_{NPES} 为 TCN 模型的输入向量, 包括新能源机组跟网/构网控制模式的 0-1 变量和系统短路比, 0 代表某机组为跟网控制模式, 1 代表某机组为构网控制模式。TCN 模型输入输出特征详见文献[21]中附录表 C1。

在利用历史数据对基于 TCN 的小干扰稳定性快速评估模型完成离线训练后, 在线应用阶段即可基于场站中新能源机组跟网/构网控制模式与短路比信息, 通过基于 TCN 的小干扰稳定性快速评估模型快速预测得到新能源场站并网系统小干扰稳定裕度与阻尼比, 实现小干扰稳定性快速评估。

4 算例验证

4.1 算例说明

算例为含 5 条馈线且每条馈线上均匀分布 2 个风电机组的新能源场站, 其拓扑结构具体如图 6 所示。场站中风电机组的连接线路单位电阻、电感分别为 $0.17 \Omega/\text{km}$ 、 $1.23 \text{ mH}/\text{km}$, 机组间距离为 0.43 km [22]; 场站中风电机组的电气、控制参数分别如文献[21]中附录表 C2、C3 所示。仿真分析硬件环境基于 Intel(R) Xeon(R) Platinum 8124M CPU @ 3.00 GHz 处理器; 仿真分析软件环境为 MATLAB R2023a。

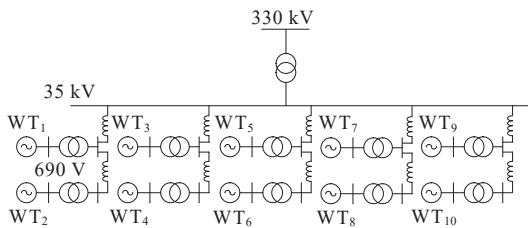


图 6 新能源场站拓扑结构

Figure 6 Topology of new energy station

新能源场站的 10 台风电机组均可在跟网/构网控制模式中切换, 即 2^{10} 种可能情况; 并进一步考虑

短路比在 $[1, 3]$ 区间内以 0.2 为间隔变化的 11 种情况, 获取了 $2^{10} \times 11 = 11\ 264$ 组 TCN 模型输入样本。基于新能源场站中短路比与风电机组的控制模式, 采用特征值计算方法即可得到对应的 11 264 组小干扰稳定裕度, 进而作为 TCN 模型输出样本。

为验证所提基于 TCN 的小干扰稳定性快速评估方法的有效性, 进一步引入 LSTM 作为对比方法, LSTM 模型的输入输出特征与 TCN 模型保持一致。TCN、LSTM 模型结构参数与训练参数分别参见文献[21]中附录表 C4、C5。按照 7:2:1 的比例将样本数据分为训练集、验证集和测试集, 分别包括 7 885、2 253 和 1 126 组样本。训练集样本用于对 TCN、LSTM 模型进行训练, 验证集样本用于模型超参数调优, 测试集用于不同方法的小干扰稳定性快速评估结果对比分析。

4.2 小干扰稳定裕度评估结果对比

以特征值计算方法得到的测试集小干扰稳定裕度和阻尼比为真实结果, 将所提 TCN、LSTM 方法得到的测试集小干扰稳定裕度和阻尼比进行对比。基于平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 指标, 验证所提 TCN 方法在稳定裕度定量预测上的有效性。MAPE、RMSE 计算模型[27]分别为

$$e_{\text{MAPE}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - y_{\text{real},i}}{y_{\text{real},i}} \right| \times 100\% \quad (30)$$

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{\text{real},i})^2} \quad (31)$$

式中, e_{MAPE} 、 e_{RMSE} 分别为 MAPE、RMSE 误差计算值; N 为测试集样本数量; y_i 为第 i 个样本模型预测值; $y_{\text{real},i}$ 为第 i 个样本真实值。

LSTM、所提 TCN 及特征值计算方法得到的测试集小干扰稳定裕度和阻尼比结果如图 7、8 所示。LSTM、所提 TCN 方法对应的 MAPE 和 RMSE 如表 1 所示。

由图 7 可以看出, LSTM、所提 TCN 方法相比于直接采用特征值计算方法得到的小干扰稳定裕度均有所上升。具体地, LSTM、所提 TCN 方法在测试集中预测得到的小干扰稳定裕度平均值分别为 0.014 0、0.012 3, 而特征值计算方法在测试集中计算得到的小干扰稳定裕度平均值为 0.011 4。因此相比于 LSTM 方法, 所提 TCN 方法得到的小干扰稳定裕度平均值降低 0.001 7, 更加贴近特征值计算小干扰稳定裕度曲线, 即真实值曲线。

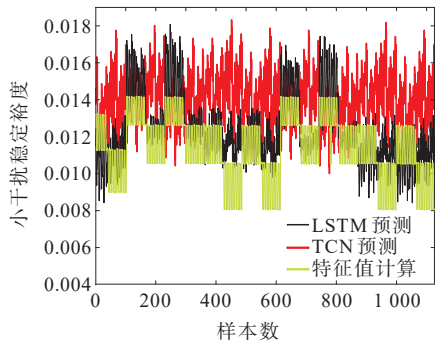


图 7 测试集小干扰稳定裕度结果对比

Figure 7 Comparison results of small-signal stability margin for test sets

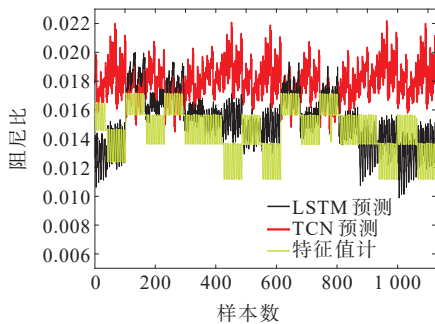


图 8 测试集阻尼比结果对比

Figure 8 Comparison results of damping ratio for test sets

表 1 LSTM、所提 TCN 方法的误差比较

Table 1 Error comparison between LSTM and TCN

| 方法 | 指标 | 误差 | |
|--------|---------|----------------------|-------------------|
| | | $\epsilon_{MAPE}/\%$ | ϵ_{RMSE} |
| LSTM | 小干扰稳定裕度 | 29.01 | 0.003 7 |
| | 阻尼比 | 27.12 | 0.004 3 |
| 所提 TCN | 小干扰稳定裕度 | 12.25 | 0.001 6 |
| | 阻尼比 | 12.37 | 0.002 1 |

由图 8 可以看出,LSTM、所提 TCN 方法的阻尼比预测值均大于零,表明系统处于强阻尼状态,与实际结果保持一致。而 LSTM、所提 TCN 方法在测试集中预测得到的阻尼比平均值分别为 0.017 9 与 0.015 2。因此相比于 LSTM 方法,所提 TCN 方法得到的阻尼比平均值降低 0.002 7,同样更加贴近特征值计算阻尼比曲线,即真实值曲线。

结合表 1 可知,所提 TCN 方法在小干扰稳定裕度预测上的 MAPE 为 12.25%,相比于 LSTM 方法的 29.01% 降低了 16.76%;所提 TCN 方法在小干扰稳定裕度预测上的 RMSE 为 0.001 6,相比于 LSTM 方法的 0.003 7 降低了 56.76%。另一方面,所提 TCN 方法在阻尼比预测上的 MAPE 为 12.37%,相比于 LSTM 方法的 27.12% 降低了 14.75%;所提

TCN 方法在阻尼比预测上的 RMSE 为 0.002 1,相比于 LSTM 方法的 0.004 3 降低了 51.16%。进一步验证了所提 TCN 方法在小干扰稳定裕度与阻尼比定量预测上的准确性。

4.3 小干扰稳定裕度计算时效性对比

通过模型驱动的特征值计算方法直接计算新能源场站并网系统的小干扰稳定裕度通常具有更高的准确性,但特征值计算方法需要耗费大量时间成本,无法满足新能源场站中机组控制模式快速切换对于时效性的要求。特别地,随着场站规模的增大,系统特征方程的复杂程度将进一步加深,使得求解小干扰稳定裕度的时间成本进一步加剧。

然而,数据驱动的 TCN 方法则有效解决了传统特征值计算方法在计算效率上的弊端。为进一步分析所提 TCN 方法在计算效率上的优势,LSTM、所提 TCN 及特征值计算方法在小干扰稳定评估上的计算时间对比如表 2 所示。

表 2 小干扰稳定评估计算时间对比

Table 2 Time comparison of small-signal stability evaluation

| 方法 | 训练时间 | 测试时间 |
|--------|--------|--------|
| LSTM | 123.14 | 13.62 |
| 所提 TCN | 111.45 | 13.21 |
| 特征值计算 | — | 906.80 |

由表 2 可以看出,虽然通过特征值计算方法直接求解小干扰稳定性裕度不需要离线训练,仅仅只需在线计算,但特征值计算方法对测试集计算耗时 906.80 s,难以满足稳定性分析的时效性需求。所提 TCN 方法虽在训练阶段耗时 111.45 s,但其对测试集仅耗时 13.21 s,相比于特征值计算方法降低了 98.54%;在实际场景中在线应用的时效性并不会受到离线训练阶段耗时影响,验证了所提 TCN 方法的快速性与时效性。

5 结语

为实现跟网/构网混合型新能源场站并网系统的小干扰稳定性快速评估,进而为混合型新能源场站控制模式的快速切换提供支撑,促进混合型新能源场站运行稳定性提升,提出了一种基于 TCN 的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估方法。

1) 在小干扰稳定性评估精度上,所提 TCN 方法相较于 LSTM 方法在小干扰稳定裕度预测上的

MAPE、RMSE分别降低了16.76%、56.76%；在阻尼比预测上的MAPE、RMSE分别降低了14.75%、51.16%，验证了所提TCN方法在小干扰稳定性评估上的准确性。

2) 在小干扰稳定裕度计算时效性上，基于特征值计算方法求解测试集小干扰稳定裕度需要耗时906.80 s，而所提TCN方法的计算时间仅为13.21 s，相比于特征值计算方法降低了98.54%，极大地提升了混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性评估的时效性，为新能源发电机组控制模式的快速切换提供了支撑，保障了混合型新能源场站的安全稳定运行。

参考文献：

- [1] 国家能源局. 新型能源体系建设提速[EB/OL]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/12/c_1310759961.htm, 2024-01-12.
National Energy Administration. Speed up the construction of a new energy system[EB/OL]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/12/c_1310759961.htm, 2024-01-12.
- [2] 国家发展和改革委员会能源研究所, 能源基金会. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.
Energy Foundation, Energy Research Institute National Development and Reform Commission. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study[R]. Beijing: Energy Research Institute National Development and Reform Commission, 2015.
- [3] 熊志, 章谋成, 姚伟, 等. 数据—物理融合驱动的含新能源电网短路电流超标评估策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 24-34.
XIONG Zhi, ZHANG Moucheng, YAO Wei, et al. Over-limit short-circuit current evaluation strategy for power grid with high penetration of renewable energy by combining data-driven and model-driven method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 24-34.
- [4] 吴琛, 刘晨曦, 黄伟, 等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 130-136.
WU Chen, LIU Chenxi, HUANG Wei, et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 130-136.
- [5] 王吉利, 占领, 张钢, 等. 提高构网型储能系统功角稳定性的附加阻尼方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 75-81+103.
WANG Jili, ZHAN Ling, ZHANG Gang, et al. Additional damping method for improving the power angle stability of grid-forming energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 75-81+103.
- [6] 李建林, 丁子洋, 游洪灏, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.
LI Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, et al. Research on stable operation of new power system supported by grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
- [7] 李威, 朱玲, 祁晓婧, 等. 新能源自同步电压源接入电力系统频率特性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 38-46.
LI Wei, ZHU Ling, QI Xiaojing, et al. Frequency characteristic analysis for power system with integration of renewable energy by self-synchronous voltage source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 38-46.
- [8] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1334.
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1334.
- [9] SAINZ L, MONJO L, CHEAH-MANE M, et al. Assessment of subsynchronous oscillations in AC grid-connected VSC systems with type-4 wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(16): 3088-3096.
- [10] 陈康, 王泽, 郭永吉. 基于grcForest模型的风电并网系统暂态电压稳定评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 31-37.
CHEN Kang, WANG Ze, GUO Yongji. Transient voltage stability assessment of wind power grid-connected system based on grcforest model[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 31-37.
- [11] 范馨予, 黄媛, 吴疆, 等. 考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 63-73.
FAN Xinyu, HUANG Yuan, WU Jiang, et al. Resilience promotion strategy for distribution network considering source-network-load-storage coordination[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 63-73.
- [12] YU M, ROSCOE A J, DYŠKO A, et al. Instantaneous penetration level limits of non-synchronous devices in the British power system[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1211-1217.
- [13] 周于清, 姚伟, 宗启航, 等. 基于运行短路比的新能源场站中跟/构网可切换单元的最优配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1091-1102.
ZHOU Yuqing, YAO Wei, ZONG Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy station based on operating short-

- circuit ratio[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 1091-1102.
- [14] 余光正,胡越,刘晨曦,等.含跟网/构网型混联多馈入系统协调优化配置方法研究[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-15[2024-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20231220.1539.010.html>.
- YU Guangzheng, HU Yue, LIU Chenxi, et al. Research on the coordinated optimization configuration method for hybrid multi-infeed systems with grid-following or grid-forming[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-15[2024-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20231220.1539.010.html>.
- [15] 郝文波,景菲,颜庆宇,等.数据驱动下基于风电场景的多时间尺度调峰调度研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 115-126.
- HAO Wenbo, JING Fei, YAN Qingyu, et al. A multi-time scale peak shaving scheduling strategy based on wind power scenario using a data-driven method[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 115-126.
- [16] 陈光宇,袁文辉,徐晓春,等.基于残差图卷积深度网络的电网无功储备需求快速计算方法[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(17): 4683-4700.
- CHEN Guangyu, YUAN Wenhui, XU Xiaochun, et al. Fast calculation method for grid reactive power reserve demand based on residual graph convolutional deep network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(17): 4683-4700.
- [17] 杨秀,胡钟毓,田英杰,等.基于Attention机制的CNN-GRU配网线路重过载短期预测方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(1): 201-209.
- YANG Xiu, HU Zhongyu, TIAN Yingjie, et al. Short-term heavy overload forecasting method of distribution net line based on CNN-GRU with Attention mechanism[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(1): 201-209.
- [18] 俞林刚,李铭,伍栋文,等.配电网拓扑参数未知场景下中压用户窃电检测方法[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(9): 91-100.
- YU Lingang, LI Ming, WU Dongwen, et al. An electricity theft detection method of medium voltage users in the case of unknown for distribution network topology parameters[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(9): 91-100.
- [19] 王鑫,李慧,叶林,等.考虑风速波动特性的VMD-GRU短期风电功率预测[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(4): 20-28.
- WANG Xin, LI Hui, YE Lin, et al. VMD-GRU based short-term wind power forecast considering wind speed fluctuation characteristics[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(4): 20-28.
- [20] 曹文远,韩民晓,谢文强,等.基于扰动观测器的电压源型逆变器负载电流前馈控制及参数设计方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(4): 862-873.
- CAO Wenyuan, HAN Minxiao, XIE Wenqiang, et al. A disturbance-observer-based load current feedforward control and parameter design method for voltage-sourced inverter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(4): 862-873.
- [21] 林涛,林政阳,李晨,等.论文附录[EB/OL]. <https://pan.baidu.com/s/1Dah9Fd21524Jw1CdVtE0i0w?pwd=hk31>, 2024-07-22.
- LIN Tao, LIN Zhengyang, LI Chen, et al. Appendix to the paper[EB/OL]. <https://pan.baidu.com/s/1Dah9Fd21524Jw1CdVtE0i0w?pwd=hk31>, 2024-07-22.
- [22] 桑顺,张琛,蔡旭,等.计及内、外部交互模态的电压源型风电场—电网稳定性量化分析[J]. *高电压技术*, 2022, 48(7): 2840-2853.
- SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Quantitative analysis of the voltage-source-type wind farm-weak grid's stability considering the internal and external interaction modes[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(7): 2840-2853.
- [23] 陈宝平. D-PMSG经VSC-HVDC外送的次/超同步振荡特性与抑制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- CHEN Baoping. Study on characteristics and suppression of sub/super-synchronous oscillation caused by power system with D-PMSG and VSC-HVDC[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [24] LI L, LI Y, MAO R, et al. Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries with a hybrid model based on TCN-GRU-DNN and dual attention mechanism[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(3): 4726-4740.
- [25] WANG Y, CHEN J, CHEN X, et al. Short-term load forecasting for industrial customers based on TCN-LightGBM[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 1984-1997.
- [26] 曾囿圻,肖先勇,徐方维.基于小波变换与BiGRU-NN模型的短期负荷预测方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(5): 103-109.
- ZENG Youjun, XIAO Xianyong, XU Fangwei. Short-term load forecasting method based on wavelet transform and BiGRU-NN model[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(5): 103-109.
- [27] 朱明,夏宇栋,常凯,等.基于粒子群优化算法的空调负荷灰箱模型辨识[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 214-221.
- ZHU Ming, XIA Yudong, CHANG Kai, et al. Identification of grey box model for air conditioning load based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(4): 214-221.