

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240332

基于电压与功率分布特性的新能源场站等值建模方法

郑天悦¹, 邓俊¹, 王潇桐², 夏楠¹, 王彤²

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 新能源场站等值建模是高比例新能源电力系统仿真分析的基础, 对于电网不同工况与故障, 新能源场站内部电压分布情况不同, 导致部分新能源机组进入低电压穿越。针对不同机组状态下新能源场站等值建模困难的问题, 提出基于电压与功率分布特性的新能源场站等值建模方法。首先, 以新能源场站一般结构为基础提出基于道路矩阵的场站拓扑结构表示方法与复杂集电线路拓扑转换方法。其次, 提出基于系统道路矩阵的故障期间新能源机组机端电压计算方法, 分析了单元变压器挡位对新能源机组进入低电压穿越状态的影响。最后, 提出保留电压分布特性的集电线路等值方法, 形成基于电压与功率分布特性的新能源场站等值建模方法。并在 PSASP 中采用 10 机新能源场站与实际光伏电站算例验证了所提拓扑转化方法与等值建模方法的准确性。

关键词: 新能源场站; 电压分布特性; 等值建模; 道路矩阵; 低电压穿越

Equivalent modeling method based on voltage and power distribution characteristics of a renewable energy station

ZHENG Tianyue¹, DENG Jun¹, WANG Xiaotong², XIA Nan¹, WANG Tong²

(1. Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710100, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: Equivalent modeling of a renewable energy station is the basis of simulation of a high proportion of renewables energy power system. For different working conditions and faults of the grid, the voltage distribution inside the renewable energy station is different. This leads to parts of units entering low-voltage ride-through (LVRT). There is difficulty in modeling the equivalence of a renewable energy station in different unit states. Thus an equivalence modeling method based on voltage and power distribution characteristics is proposed. First, based on a general structure, a topology representation method of stations based on a road matrix is proposed, and the topology conversion method of complex collector lines is analyzed. Secondly, a system road matrix-based calculation method for converter voltage during faults is proposed, and the effects of renewable energy power and unit transformer blocking on renewable energy units entering LVRT are analyzed. Finally, a collector line equivalence method that preserves the voltage distribution characteristics is proposed, and a renewable energy station equivalence modeling method based on the voltage and power distribution characteristics is formed. The accuracy of the proposed topology transformation method and the equivalence modeling method is verified by using a 10-node renewable energy station and an actual PV station example based on PSASP.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202155481A-0-5-ZN).

Key words: renewable energy station; voltage distribution characteristics; equivalence modeling; road matrix; LVRT

0 引言

在“双碳”目标的引领下, 我国新能源装机与

发电量逐年增加^[1-3], 由于新能源特性不同于传统火电机组, 使得系统电源侧不确定性增加^[4-5], 电力系统仿真分析对电网安全稳定运行至关重要^[6]。然而, 新能源模型阶数与并网规模远超传统电源, 制约了含有大规模新能源电力系统的仿真与安全稳定分析^[7-8], 因此, 亟需研究适用于工程实际的新能源场

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202155481A-0-5-ZN)

站等值建模方法,提升新能源场站仿真分析准确度。

当前新能源场站等值建模相关研究集中于机组分类指标、分群方法与等值参数计算三方面^[9]。在分类指标选择方面,可采用潮流计算电压结果^[10]和故障期间电压、功率等电气量作为特征信息^[11-12],对于风电机组也可考虑故障期间 Crowbar 和 Chopper 保护动作状态作为分群依据进行等值^[13-14]。此外,也可采用稳态信息作为分类指标,文献[15]根据新能源机组距并网点远近与输出功率进行分群。文献[16]考虑故障穿越特性,采用迭代方法计算故障稳态电压,并加入风速作为分类指标。

在分群方法方面,K-means 及其改进算法因原理简单被广泛使用^[10,17-19],其他聚类算法如模糊 C 均值及其改进算法^[20-21]、基于神经网络的聚类算法也被应用于新能源场站等值分群中^[14,22]。此外,文献[23]通过定义聚合指标门槛值进行在线分群,其分群过程与 K-means 的思想近似。

在等值参数计算方面,一个机群内可采用单机倍乘的方式计算机组以及变压器参数^[12],而集电线路参数等值较为复杂,其等值方法有加权电压差^[19,24]、等损耗法^[25-26],对于集电线路的拓扑转换方法,文献[27]采用分段处理的方法,将机组之间的混联结构(放射式)变为纯并联结构,再进行机群的聚合。文献[28]采用从场站末端逐点聚合的方法,并采用无功和有功误差分别结算等值电抗和电阻。然而当前集电线路等值参数计算方法复杂,缺少对整场机组等值参数的高效计算方法,在处理不同拓扑场站等值参数时存在局限性。

2023 年 10 月,国家能源局发布了行业标准 DL/T 2671-2023《电力系统仿真用电源聚合等值和建模导则》,在不考虑进入低电压穿越范围的情况下,对新能源场站机组分群与等值进行了指导与说明。然而,在实际应用中由于系统故障情况多样,对于新能源场站分群与等值过程,不宜采用故障期间场站详细模型的电压跌落情况分布作为分群依据。因此,考虑不同系统故障情况下进入低电压穿越机组的范围,并提升整场等值参数计算的简便性与工程实用性,是新能源场站等值建模方面有待解决的关键问题之一。

针对上述问题,本文首先分析了新能源场站机电暂态模型,提出了基于道路矩阵的新能源场站拓扑结构表示方法,并分析得到了复杂集电线路拓扑转换方法。其次,提出了基于系统道路矩阵的故障期间新能源机组机端电压计算方法,并基于电压分布特性与机组有功功率形成新能源场站等值建模方法,解决了等值计算方法工程实用性弱的问题。最

后分别采用 10 机与 30 机新能源场站详细模型验证了所提等值建模方法的有效性。

1 新能源场站阻抗分布特性

1.1 新能源机组机电暂态模型

根据 GB/T 32826-2016《光伏发电系统建模导则》与 GB/T 36237-2023《风能发电系统通用电气仿真模型》^[29-30],考虑新能源机电暂态时间尺度,正常运行情况下,新能源机组接收场站控制指令,通过 PI 控制调节输出有功和无功功率。故障期间新能源机组控制切换至低电压穿越控制^[31-33],通常新能源机组低电压穿越控制策略采用定电流控制,其故障期间有功电流 I_{pf} 、无功电流 I_{qf} ^[31]分别为

$$I_{pf} = K_{p1}U_t + K_{p2}I_{p0} \quad (1)$$

$$I_{qf} = K_{q1}(U_{Lin} - U_t) + K_{q2}I_{q0} \quad (2)$$

式中: U_t 为新能源机组机端电压; U_{Lin} 为进入低电压穿越阈值,通常取为 0.9 p.u.; K_{p1} 、 K_{p2} 均为有功电流控制系数; K_{q1} 、 K_{q2} 均为无功电流控制系数; I_{p0} 、 I_{q0} 分别为初始有功电流和初始无功电流。

在故障清除后,考虑机端电压立刻恢复至大于 U_{Lin} ,此时新能源进入电压穿越恢复状态,有功电流通常按照指定斜率 K_{rec} 恢复,可得故障后 t 时刻有功电流值 I_{pr} 为

$$I_{pr} = I_n K_{rec}(t - t_c) + I_{pf} \quad (3)$$

式中: I_n 为机组额定电流; t_c 为故障清除时刻。

结合工程应用实际,无功功率不设置故障恢复控制,即故障清除后立即恢复至故障前稳态值。

1.2 集电线路道路矩阵构建

新能源场站通常依据地形修建,场站拓扑结构各异,集电线路拓扑复杂,传统等值通常只考虑放射式与干线式拓扑,普适性低,本文提出基于道路矩阵的新能源场站阻抗等值方法。

设新能源场站有 n 台新能源机组,对应节点分别为 N_1, N_2, \dots, N_n ,每台新能源机组接入一台 35 kV 箱式升压变压器。集电线路中有 m 个线路汇集点,对应节点分别为 $N_{n+1}, N_{n+2}, \dots, N_{n+m}$ 。场站 110 kV 主变压器低压侧为节点 R。由于新能源场站集电线路不存在环网,为典型树结构,其中根节点为 R,规定每条支路指向根节点的方向为正方向,支路编号与其起点编号一致,以节点 N_i 为起点,指向 R 的支路编号为 b_i 。节点的道路是指节点沿树到根所经过的路径上的支路集合,因此对于一个集电线路网路,可得唯一的道路矩阵 T ,且其为 $(n+m)$

阶方阵。 \mathbf{T} 矩阵中第 i 行、第 k 列元素 t_{ik} 为

$$t_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{支路 } k \text{ 在道路 } i \text{ 上} \\ 0, & \text{支路 } k \text{ 不在道路 } i \text{ 上} \end{cases} \quad (4)$$

由此可得集电线路道路矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1n} & \cdots & t_{1(n+m)} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2n} & \cdots & t_{2(n+m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & t_{nn} & \cdots & t_{n(n+m)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ t_{(n+m)1} & t_{(n+m)2} & \cdots & t_{(n+m)n} & \cdots & t_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

设第 k 条支路阻抗为 z_k , 场站中 $m+n$ 条支路的阻抗构成矩阵 \mathbf{Z} , 如式(6)所示。

$$\mathbf{Z} = [z_1 \quad z_2 \quad \cdots \quad z_{m+n}] \quad (6)$$

在工程应用中, 场站集电线路布局信息可完全储存在道路矩阵 \mathbf{T} 与阻抗矩阵 \mathbf{Z} 中, 便于进行后续等值计算。

1.3 新能源场站集电线路拓扑转换

集电线路拓扑转化是等值计算的基础, 首先将场站复杂拓扑转换为放射式拓扑, 如图 1 所示, 进而获得每台新能源机组的等值阻抗, 再进行后续的机组聚类、等值机阻抗计算, 拓扑转化过程遵循线路损耗不变的原则。

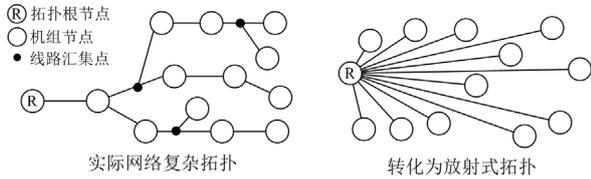


图 1 转换前后新能源场站网络拓扑结构

Fig. 1 Network topology of renewable energy station before and after conversion

将复杂拓扑转换为放射式拓扑时, 若有 h 个新能源机组的输出电流 $I_1 \sim I_h$ 流经支路 k , 则支路 k 的等值阻抗为

$$z_{\text{eq}k} = \frac{(I_1 + I_2 + \cdots + I_h)^2}{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_h^2} z_k \quad (7)$$

由于节点 $N_{n+1} \sim N_{n+m}$ 无注入功率, 在等值计算中无需计算其等值阻抗, 故取 \mathbf{T} 矩阵中前 n 行为等值道路矩阵 \mathbf{T}_G , 场站电流向量 \mathbf{I} 为

$$\mathbf{I} = [I_1 \quad I_2 \quad \cdots \quad I_n] \quad (8)$$

各条支路流过电流 \mathbf{I}_b 为

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{I} \times \mathbf{T}_G \quad (9)$$

各条支路流过电流的平方, 即式(7)等值阻抗的分子, 表达式 \mathbf{I}_{Iz} 为

$$\mathbf{I}_{\text{Iz}} = \mathbf{I}_b \odot \mathbf{I}_b \quad (10)$$

式中, “ \odot ” 表示计算矩阵的 Hadamard 积。每条支路流过电流平方和, 即等值阻抗的分母, 表达式 \mathbf{I}_{fm} 为

$$\mathbf{I}_{\text{fm}} = \mathbf{I} \odot \mathbf{I} \times \mathbf{T}_G \quad (11)$$

可得网络中第 k 条支路的等值阻抗 $z_{\text{eq}k}$ 为

$$z_{\text{eq}k} = \frac{i_{\text{Iz}k}}{i_{\text{fm}k}} z_k \quad (12)$$

由此获得等值阻抗向量为

$$\mathbf{Z}_{\text{eq}} = [z_{\text{eq}1} \quad z_{\text{eq}2} \quad \cdots \quad z_{\text{eq}(m+n)}] \quad (13)$$

第 i 台新能源机组的集电线路等值阻抗 z_{bi} 为该台新能源机组道路上所有支路等值阻抗 $z_{\text{eq}k}$ 之和, 每台新能源机组集电线路阻抗为

$$z_{\text{bi}} = t_{i1} z_{\text{eq}1} + t_{i2} z_{\text{eq}2} + \cdots + t_{i(m+n)} z_{\text{eq}(m+n)} \quad (14)$$

基于道路矩阵可得等值阻抗向量 \mathbf{Z}_b 为

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_b = \mathbf{T}_G \times \mathbf{Z}_{\text{eq}}^T \\ \mathbf{Z}_b = [z_{b1} \quad z_{b2} \quad \cdots \quad z_{b(m+n)}] \end{cases} \quad (15)$$

由此可得新能源场站中各台新能源机组集电线路阻抗, 集电线路复杂拓扑转换为放射式拓扑, 作为后续等值计算的基础。

1.4 单元变压器挡位对电压分布的影响

若单元变压器处于 1 挡, 此时系统发生故障, 则新能源机端电压最低, 机组更容易进入低穿; 若单元变压器处于 5 挡, 机端电压最高, 机组不容易进入低穿, 新能源场站单元变压器挡位情况如表 1 所示。

表 1 新能源场站单元变压器挡位

Table 1 Tap position of unit transformer in renewable energy station

挡位	高压侧电压/kV	低压侧电压/kV	变比
1	36.75		53.260
2	35.875		51.992
3	35	0.69	50.724
4	34.125		49.456
5	33.25		48.188

考虑 35 kV 单元变压器高压侧挡位分别为 $1.05U_N$ 、 $1.025U_N$ 、 U_N 、 $0.975U_N$ 、 $0.95U_N$, 设新能源进入低电压穿越阈值 U_{Lin} 为 0.9 p.u., 单元变压器 A 挡位为 $0.95U_N$ (5 挡), 变压器 B 挡位为 $1.05U_N$ (1 挡)。若故障发生后两台单元变压器高压侧电压均跌落至 0.86 p.u., 则变压器 A 低压侧电压为 0.905 p.u., 高于 U_{Lin} , 机组未进入低电压穿越; 单元变压器 B 低压侧电压为 0.819 p.u., 低于 U_{Lin} , 机组进入低电压穿越控制。

2 故障期间场站电压分布

对于不同的系统故障情况,受到新能源场站内集电线路以及单元变压器挡位的影响,进入低电压穿越的新能源机组范围可能不同。本节通过计算故障后新能源机端电压分布情况,进而判断场站内进入低穿的新能源机组范围。

2.1 含有新能源场站的系统节点阻抗矩阵

由第1节分析可见,新能源场站内部拓扑可表示为道路矩阵(式(5)),在此基础上考虑故障节点与外电网等值节点,系统整体结构如图2所示。对于不含有连支的网络,节点f自阻抗为 z_{s2} ,对于不同的新能源机组,电压故障分量相同。

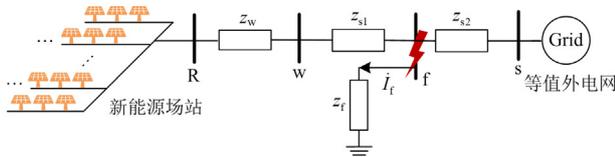


图2 故障期间新能源送出系统结构

Fig. 2 Structure of renewable energy delivery system during fault

由图2可见,在新能源场站道路矩阵的基础上,增加 z_w 、 z_{s1} 、 z_{s2} 对应的列,R、w、f对应的行,可以获得送端系统道路矩阵 T_s ,如式(16)所示。

$$T_s = \begin{bmatrix} T & I_{(m+n) \times 1} & I_{(m+n) \times 1} & I_{(m+n) \times 1} \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

对于 n 个节点的网络拓扑可获得其节点-支路关联矩阵 A ,则可得节点导纳矩阵 Y 为

$$Y = Ay_b A^T \quad (17)$$

式中, y_b 为支路导纳矩阵。

$$y_b = \text{diag}(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (18)$$

系统节点阻抗矩阵 Z 为

$$Z = Y^{-1} \quad (19)$$

对于不含有连支的网络,设其道路矩阵为 T ,道路矩阵与节点-支路关联矩阵 A ,如式(20)所示^[34]。

$$A^{-1} = T^T \quad (20)$$

结合式(17)、式(19)可得

$$Z = Ty_b^{-1}T^T \quad (21)$$

由于支路阻抗矩阵 z_b 与支路导纳矩阵 y_b 互为逆矩阵,可得

$$z_b = \text{diag}(z_1, z_2, \dots, z_n) = y_b^{-1} \quad (22)$$

因此,含有新能源场站的送端系统节点阻抗矩阵可采用道路矩阵与支路阻抗矩阵表示,如式(23)所示。

$$Z = T_s z_b T_s^T \quad (23)$$

2.2 新能源场站电压分布

根据图2可得,故障发生后新能源场站中第 i 台机组并网点电压 \dot{U}_{if} 可表示为^[35]

$$\dot{U}_{if} = \dot{U}_{i|0} - Z_{if} \dot{I}_f \quad (24)$$

式中: $\dot{U}_{i|0}$ 为故障发生前新能源机组 i 的单元变压器低压侧电压; Z_{if} 为节点阻抗矩阵中节点 i 、 f 间的互阻抗; \dot{I}_f 为注入故障点电流。故障节点 f 需满足故障的边界条件,如式(25)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{ff} = \dot{U}_{f|0} - Z_{ff} \dot{I}_f \\ \dot{U}_{ff} - z_f \dot{I}_f = 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\dot{U}_{f|0}$ 、 \dot{U}_{ff} 分别为故障发生前后故障节点 f 电压; Z_{ff} 为节点阻抗矩阵中故障节点 f 自阻抗; z_f 为包含过渡电阻与基于正序等效定则的不对称短路附加阻抗。结合式(24)、式(25),故障发生后第 i 台机组并网点电压 \dot{U}_{if} 为

$$\dot{U}_{if} = \dot{U}_{i|0} - \frac{Z_{if}}{Z_{ff} + z_f} \dot{U}_{f|0} \quad (26)$$

由式(23)^[34]可见,可根据故障电压判断场站内新能源机组进入低电压穿越的情况。

3 新能源场站等值方法

3.1 基于电压与功率分布的聚类方法

新能源场站功率分布直接影响场站等值后有功率恢复阶段的等值效果。在场站详细模型中,设各台机组的额定功率均为 P_n ,其有功功率恢复速率均为 $P_n K_{rec}$ p.u./s,在故障期间未限流的情况下,低电压穿越期间机组输出有功电流如式(1)所示,在考虑 $K_{p1} = 0$ 时,故障期间有功电流与机组初始有功电流成正比。

在详细模型中,对于 H 台机组不同的初始有功功率,故障后有功功率恢复所需时间不同,功率较小的机组可以快速恢复,而功率较大的机组所需恢复时间更长,场站整体恢复速率呈现先高后低^[15]的趋势,即处于恢复状态的机组由 H 台逐渐递减至1台,并最终进入稳态,场站整体恢复速率由 $HP_n K_{rec}$ p.u./s降低至 $P_n K_{rec}$ p.u./s。而在单机等值模型中,场站恢复速率始终相同。

根据式(26)计算得到故障发生后新能源场站内电压分布情况,并基于此对全部新能源机组进行聚类。聚类过程如下所述。

(1) 判断机组是否全部进入低穿,若全部进入低穿,则按照电压与功率分布将场站分为四群,若进

一步化简等值模型, 可分为大功率低电压、小功率高电压两群。

(2) 若没有全部进入低穿, 则首先按照是否进入低穿分为两群, 对于进入低穿的机群, 若其机组占场站机组比例超过 50%, 则按照有功功率再分为两群, 即场站整体划分为三群, 若占比超过 75%, 则按照有功功率分为三群, 即场站整体划分为四群。

在聚类过程中, 由于本文所提方法不需要对场站详细模型进行机电暂态仿真而获得信息, 数据集仅包含机组电压与有功功率, 因此将两类数据归一化后, 采用 K-means 算法进行聚类, 即可在满足计算要求的同时使得本方法具有更好的工程实用性。

3.2 集电线路与单元变压器等值

对于新能源机组单元变压器等值, 考虑场站中所有单元变压器型号相同, 阻抗均为 Z_T , 故采用单机倍乘进行等值^[36-37], 第 j 台等值机单元变压器阻抗 Z_{Tj} 为

$$Z_{Tj} = Z_T / N \quad (27)$$

式中, N 为等值机所代表群内新能源机组数量。

等值单元变压器容量 S_{Tj} 为

$$S_{Tj} = NS_T \quad (28)$$

式中, S_T 为一台单元变压器容量。

对于场站集电线路等值, 为使等值机可反映场站电压跌落情况, 根据机群内平均稳态机端电压, 计算集电线路参数, 即为等压降法。获取场站主变压器低压侧电压 \dot{U}_{s0} , 对于第 j 个机群内 N 台机组, 设等值机稳态机端电压为详细模型电压 \dot{U}_{wi} 的平均值 \dot{U}_{dzj} , 如式(29)所示。

$$\dot{U}_{dzj} = \sum_{i=1}^N \frac{\dot{U}_{wi}}{N} \quad (29)$$

由此计算集电线路与等值变压器总阻抗 z_{zdj} 为

$$z_{zdj} = \frac{\dot{U}_{dzj} - \dot{U}_{s0}}{\dot{I}_{dzj}} \quad (30)$$

式中, \dot{I}_{dzj} 为第 j 个机群输出电流。进而获得等值集电线路参数 z_{sdj} 为

$$z_{sdj} = z_{zdj} - \frac{Z_T}{N} \quad (31)$$

同时, 为使新能源场站输出总功率一致, 对比等损耗法, 对等值机进行功率补偿。采用基于道路矩阵将复杂拓扑转换为放射式拓扑后, 各台新能源机组等值阻抗如式(15)所示, 在此基础上根据分群结果, 将各群机组阻抗采用等损耗法再次进行等值。对于第 j 台等值机, 设其群内共有 N 台新能源机组,

则其等损耗阻抗 z_{sdj} 为

$$z_{sdj} = \sum_{i=1}^N (I_i^2 z_{bi}) / \left(\sum_{i=1}^N I_i \right)^2 \quad (32)$$

式中, I_i 为第 i 台新能源机组输出电流。

根据式(31), 计算采用等压降法与等损耗法等值机 j 在集电线路上的总损耗之差 ΔS , 在标幺值系统中有

$$\Delta S = \Delta I = \left(\sum_{i=1}^N I_i \right)^2 (z_{dzj} - z_{sdj}) \quad (33)$$

由此可得补偿线路损耗后, 等值机 j 输出电流 I_{dj} 为

$$I_{dj} = \Delta S + \sum_{i=1}^N I_i \quad (34)$$

由于等值过程中已经考虑了单元变压器挡位对电压分布的影响, 等值单元变压器挡位均设定为 1 挡。基于上述分析, 考虑电压与功率分布特性的新能源场站等值建模方法流程如图 3 所示。

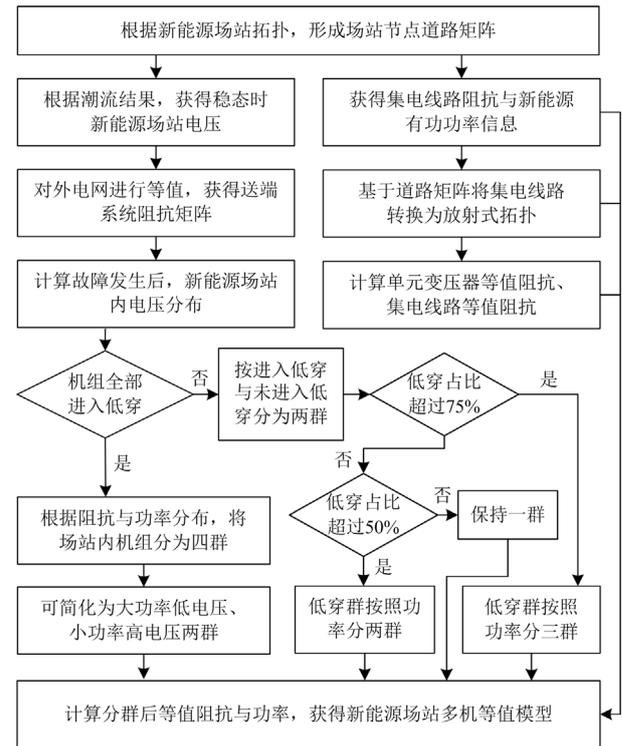


图 3 新能源场站等值建模方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the equivalent modeling method for renewable energy station

由图 3 可知, 所提等值建模方法主要分为聚类与等值两部分, 且两者均以新能源场站道路矩阵为基础, 最终可根据稳态时场站功率分布以及故障期间电压分布情况获得新能源场站两机、三机、四机

等值模型。

4 仿真验证

4.1 集电线路拓扑转化算例

设置由 10 台新能源机组构成的新能源场站，节点 $N_1 \sim N_7$ 为新能源机组节点， $N_8 \sim N_{10}$ 为线路汇集点， R 为根节点，每个节点指向根节点的支路分别为 $b_1 \sim b_{10}$ ，系统拓扑如图 4 所示。

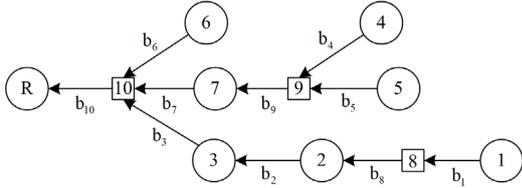


图 4 10 节点新能源场站拓扑结构

Fig. 4 Topology of 10-node renewable energy station

由于前 7 个节点为新能源机组节点，故 T_G 为 7 行 10 列矩阵，如式(35)所示。

$$T_G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

单台机组额定功率为 3.5 MW，注入电流向量 I 为

$$I = [3.1 \quad 2.5 \quad 1.9 \quad 2.4 \quad 3.2 \quad 1.2 \quad 2.6] \quad (36)$$

场站集电线路型号为：ZC-YJV22-26/35 kV 3×95，线路电阻为 0.2 Ω/km，线路电抗为 0.12 Ω/km，场站支路阻抗行向量 Z 为

$$Z = \begin{bmatrix} 0.005 + j0.0032 & 0.008 + j0.0050 \\ 0.004 + j0.0025 & 0.007 + j0.0044 \\ 0.003 + j0.0019 & 0.004 + j0.0025 \\ 0.009 + j0.0057 & 0.003 + j0.0019 \\ 0.005 + j0.0032 & 0.003 + j0.0019 \end{bmatrix} \quad (37)$$

设基准电压为 35 kV，基准功率为 100 MW，阻抗基准值为 12.25 Ω。

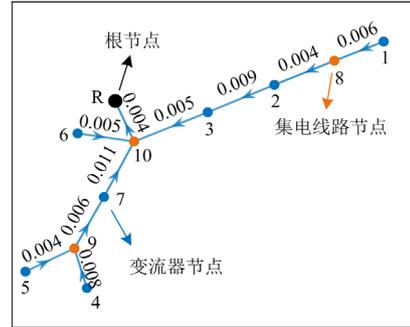
根据式(9)一式(15)，计算得到新能源机组等值阻抗行向量 Z_b 为

$$Z_b = \begin{bmatrix} 0.0550 + j0.0346 & 0.0470 + j0.0296 \\ 0.0312 + j0.0196 & 0.0630 + j0.0397 \\ 0.0590 + j0.0372 & 0.0236 + j0.0149 \\ 0.0462 + j0.0291 \end{bmatrix} \quad (38)$$

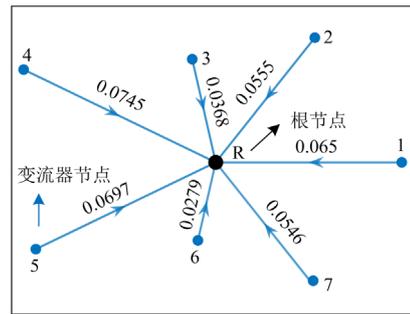
由此可得集电线路放射式拓扑及其等值阻

抗，集电线路原始拓扑与转换后的放射式拓扑如图 5 所示。

图 5(a)为由系统道路矩阵逆向生成的新能源场站拓扑图，图中各边标注值为支路阻抗模值，图 5(b)为转换后的集电线路放射式拓扑，图中标注值为计算后等值阻抗模值，各新能源机组节点距离根节点 R 的长度代表其等值阻抗的大小，由此可直观获得各台新能源机组与并网节点间的等值阻抗。



(a) 实际集电线路拓扑



(b) 转换后放射式拓扑

图 5 转换前后集电线路拓扑结构

Fig. 5 Topology of collector line before and after conversion

4.2 新能源场站等值算例

以某光伏电站为例，在 PSASP 中搭建详细模型，并采用本文所提方法进行等值建模。光伏电站并网点电压为 35 kV，额定装机容量为 100 MW，电站共有 32 台单元变压器，每台单元变压器等效为 1 个发电单元，其额定容量为 3.3 MW，集电线路导线型号共 4 种，阻抗值如表 2 所示。

表 2 4 种型号导线阻抗参数

Table 2 Impedance parameters of four types of conductors

导线序号	截面/mm ²	电阻/(Ω/km)	电抗/(Ω/km)
1	95	0.200	0.126
2	150	0.159	0.122
3	185	0.103	0.113
4	240	0.118	0.369

光伏电站整体拓扑结构如图 6 所示, 32 台单元变压器经集电线路分别接入两段 35 kV 母线, 再汇集至并网节点, 经主变升压至 110 kV 接入电网。

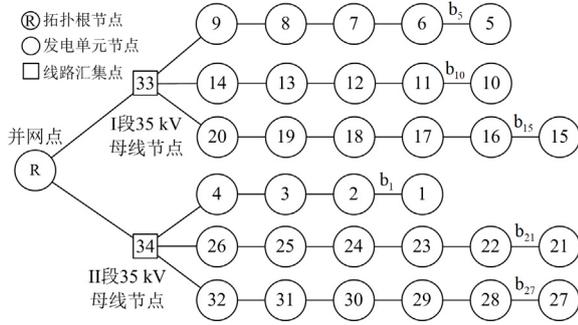


图 6 光伏电站集电线路拓扑结构

Fig. 6 Collector line topology for photovoltaic power plants

设场站中各节点至根节点(并网节点)道路上首条支路编号与该节点编号一致, 光伏电站各支路线路型号及阻抗如表 3 所示。

表 3 各支路线路型号及阻抗

Table 3 Line type and impedance of each branch

支路	型号	电阻/p.u.	电抗/p.u.	支路	型号	电阻/p.u.	电抗/p.u.
b ₁	1	0.0094	0.0059	b ₁₈	1	0.0094	0.0059
b ₂	1	0.0122	0.0077	b ₁₉	2	0.0074	0.0057
b ₃	1	0.0104	0.0066	b ₂₀	3	0.0051	0.0056
b ₄	1	0.0746	0.0470	b ₂₁	1	0.0094	0.0059
b ₅	1	0.0104	0.0065	b ₂₂	2	0.0074	0.0057
b ₆	1	0.0094	0.0059	b ₂₃	1	0.0094	0.0059
b ₇	1	0.0094	0.0059	b ₂₄	1	0.0094	0.0059
b ₈	1	0.0088	0.0056	b ₂₅	2	0.0074	0.0057
b ₉	2	0.0247	0.0190	b ₂₆	3	0.0351	0.0385
b ₁₀	1	0.0094	0.0059	b ₂₇	1	0.0094	0.0059
b ₁₁	1	0.0094	0.0059	b ₂₈	1	0.0094	0.0059
b ₁₂	1	0.0094	0.0059	b ₂₉	1	0.0094	0.0059
b ₁₃	1	0.0094	0.0059	b ₃₀	1	0.0094	0.0059
b ₁₄	2	0.0461	0.0353	b ₃₁	2	0.0074	0.0057
b ₁₅	1	0.0094	0.0059	b ₃₂	3	0.0102	0.0112
b ₁₆	1	0.0094	0.0059	b ₃₃	4	0.0188	0.0589
b ₁₇	1	0.0094	0.0059	b ₃₄	4	0.0188	0.0589

设置场站中各发电单元输出有功功率均处于 1.6~3.3 MW 区间, 如表 4 所示, 新能源场站输出有功功率为 80.7 MW。

单元变压器容量为 3.3 MW, 32 台单元变压器参数相同, 其具体如表 5 所示。

4.2.1 功率补偿验证

设置新能源场站经 110 kV 线路送出, 线路距离 400 km, 受端系统等值阻抗为 $0.1 \angle 85^\circ$, 设置三相短路故障位于 110 kV 线路末端, 过渡电阻为 0.17 p.u., 场站内电压分布如图 7 所示。由图 7 可见,

此时新能源场站内部分机组进入低电压穿越控制, 采用本文所提方法计算场站内电压分布, 并与场站详细模型仿真结果相对比, 结果如图 8 所示, 机组分群结果如图 9 所示。

表 4 场站中各发电单元输出有功功率情况

Table 4 Active power output of each generating unit in the station

序号	功率/MW	序号	功率/MW	序号	功率/MW	序号	功率/MW
1	2.03	9	2.29	17	2.50	25	1.69
2	3.03	10	3.28	18	3.30	26	2.06
3	3.15	11	1.75	19	3.06	27	2.49
4	2.79	12	2.15	20	2.94	28	3.25
5	2.83	13	2.47	21	1.64	29	2.81
6	1.99	14	1.70	22	2.37	30	2.13
7	2.58	15	2.83	23	2.88	31	2.10
8	2.98	16	2.55	24	1.79	32	3.29

表 5 单元变压器参数

Table 5 Unit transformer parameters

参数	数值
额定容量/MVA	3.3
高压侧额定电压/kV	$37 \pm 2 \times 2.5\%$
低压侧额定电压/kV	0.8
短路阻抗/%	4.5
短路损耗/kW	27.62
空载电流/%	2.5
空载损耗/kW	2.81

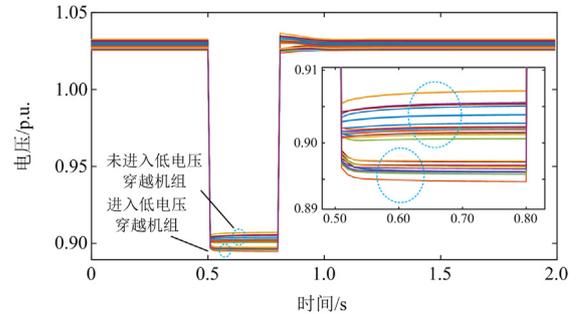


图 7 稳态及故障期间详细模型电压分布

Fig. 7 Detailed model voltage distribution during steady state and fault

可见, 机组状态计算结果中未进入低电压穿越机群 1 包含 20 台机组, 进入低电压穿越机群 2 包含 12 台机组, 对比场站详细模型与计算结果中各台机组进入低电压穿越情况, 场站中 27 台机组状态判断准确, 准确率为 84.5%。由此, 进一步计算机群 1、2 的等值机、单元变压器与集电线路参数。将新能源场站中全部机组划分为进入低电压穿越与未进入低电压穿越两群。

基于机组分群结果进行等值, 等值机功率、集电线路阻抗、单元变压器参数如表 6 所示。

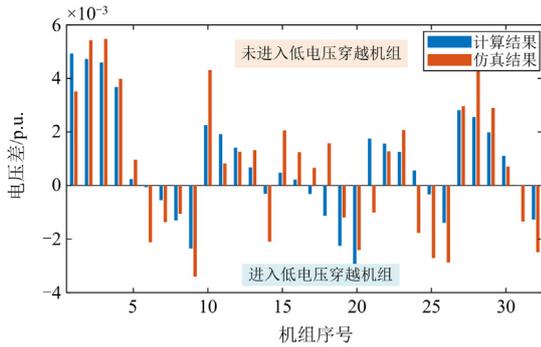


图 8 新能源场站电压计算结果对比

Fig. 8 Comparison of voltage calculation results of renewable energy station

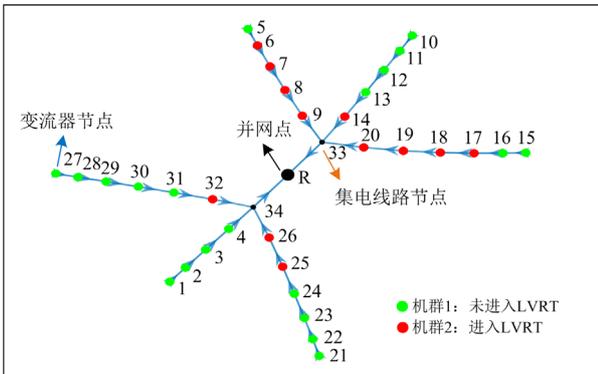


图 9 新能源场站分群结果

Fig. 9 Subgroup results of the renewable energy station

表 6 等值机参数

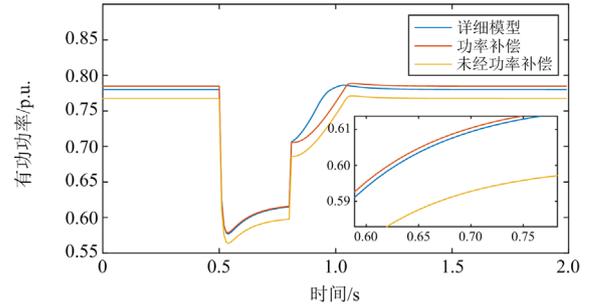
Table 6 Equivalent unit parameters

参数	等值机 1	等值机 2
单元变压器容量/MVA	66.0	39.6
单元变压器电阻/p.u.	0.0127	0.021
单元变压器电抗/p.u.	0.068	0.113
线路电阻/p.u.	0.0394	0.0288
线路电抗/p.u.	0.0741	0.0671
补偿功率/p.u.	0.007 - j0.006	0.0069 - j0.004
额定功率/p.u.	0.5102 - j0.006	0.3107 - j0.004

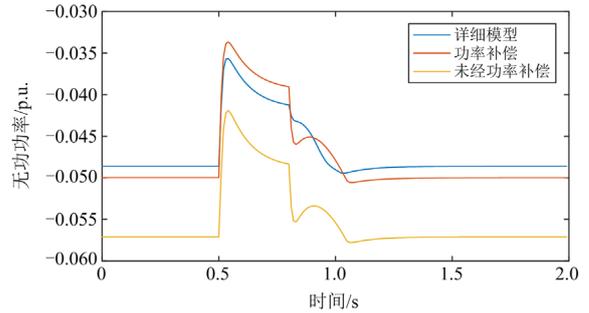
等值机稳态控制与电压穿越控制参数设置值与详细模型相同，对比加入与不加入功率补偿两种等值方法。新能源场站输出有功功率、无功功率如图 10 所示。

由图 10 可见，未考虑功率补偿时，等值模型有功、无功功率均存在一定的稳态误差；进行功率补偿后，稳态偏差显著减小。由于此时部分机组进入低电压穿越，部分机组未进入低电压穿越(恒功率因数控制)，导致等值模型对无功功率的拟合存在偏差，但故障期间平均误差为 0.0018 p.u.，等值模型

可以反映场站详细模型的动态特性。



(a) 新能源场站输出有功功率



(b) 新能源场站输出无功功率

图 10 功率补偿前后场站有功功率、无功功率对比

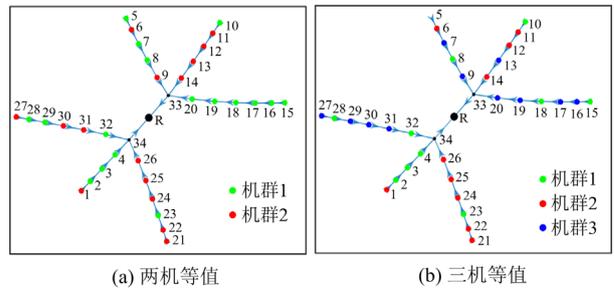
Fig. 10 Comparison of active and reactive power of the station before and after power compensation

4.2.2 等值效果对比

分别设置不同场站有功功率以及电压跌落程度的 3 个工况，对比传统两机等值^[12]、所提方法两机等值、所提方法三机等值的效果。

(1) 工况 1：场站输出总有功功率为 80 MW，110 kV 线路末端发生三相短路故障，场站电压跌落至 0.25 p.u.，场站分群结果如图 11 所示，新能源场站输出有功功率、无功功率对比曲线如图 12 所示。

(2) 工况 2：场站输出总有功功率为 50 MW，110 kV 线路末端发生两相接地短路故障，场站电压跌落至 0.5 p.u.，场站分群情况如图 13 所示，新能源场站输出有功功率、无功功率对比曲线如图 14 所示。

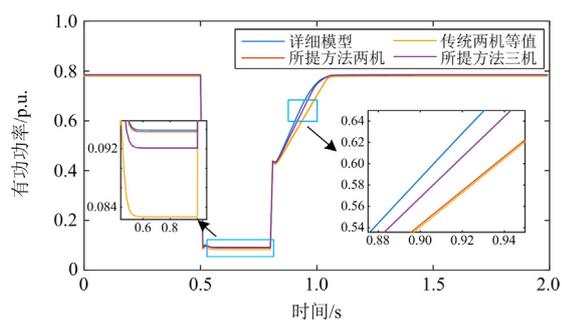


(a) 两机等值

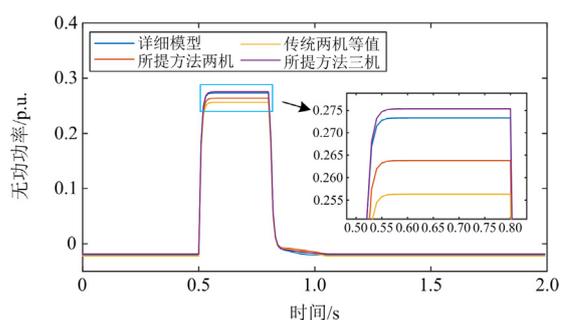
(b) 三机等值

图 11 工况 1 新能源场站分群结果

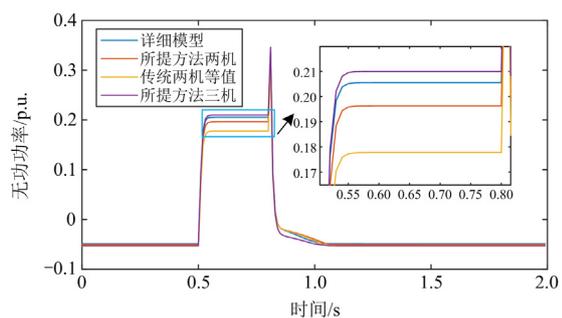
Fig. 11 Subgroup results of the renewable energy station under working condition 1



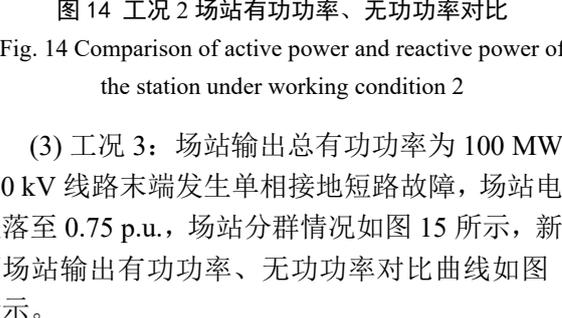
(a) 新能源场站输出有功功率



(b) 新能源场站输出无功功率



(a) 新能源场站输出有功功率



(b) 新能源场站输出无功功率

图 12 工况 1 场站有功功率、无功功率对比
Fig. 12 Comparison of active power and reactive power of the station under working condition 1

图 14 工况 2 场站有功功率、无功功率对比

Fig. 14 Comparison of active power and reactive power of the station under working condition 2

(3) 工况 3: 场站输出总有功功率为 100 MW, 110 kV 线路末端发生单相接地短路故障, 场站电压跌落至 0.75 p.u., 场站分群情况如图 15 所示, 新能源场站输出有功功率、无功功率对比曲线如图 16 所示。

由以上 3 个工况对比可见, 在故障期间所提方法相比于传统等值方法有更小的有功功率、无功功率偏差, 而三机等值方法的优势在于, 当详细模型机组输出功率存在差异时, 三机等值模型可较好等值其有功功率恢复过程; 当场站机组有功功率均为

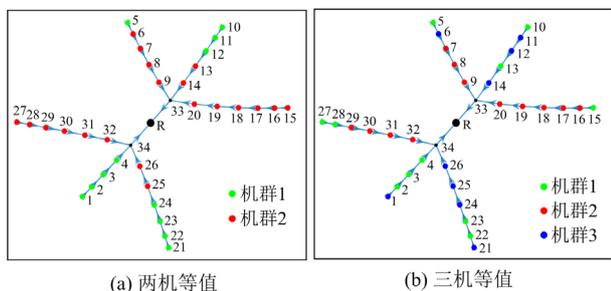
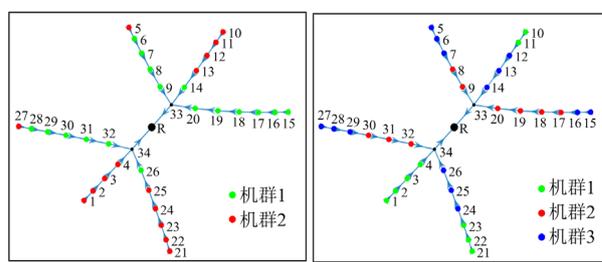


图 13 工况 2 新能源场站分群结果

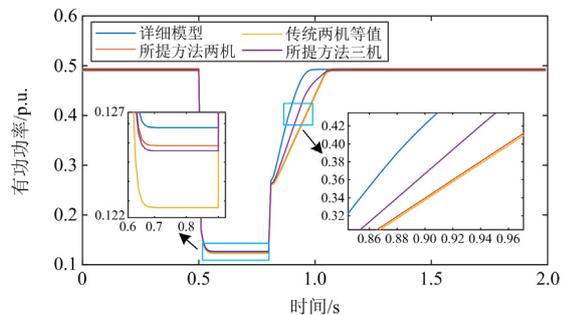
Fig. 13 Subgroup results of the renewable energy station under working condition 2



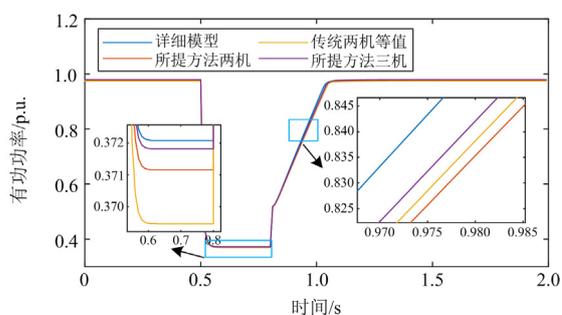
(a) 两机等值 (b) 三机等值

图 15 工况 3 新能源场站分群结果

Fig. 15 Subgroup results of the renewable energy station under working condition 3



(a) 新能源场站输出有功功率



(a) 新能源场站输出有功功率

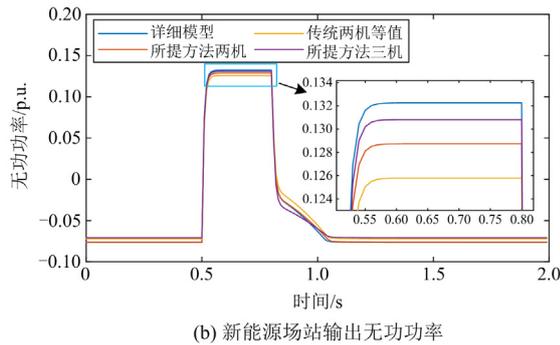


图 16 工况 3 场站有功功率、无功功率对比

Fig. 16 Comparison of active power and reactive power of the station under working condition 3

满发(工况 3)时,此时两机等值已经可以模拟模型的恢复过程,无需进一步增加等值机。

5 结论

针对机组状态不同时新能源场站等值建模困难的问题,本文提出了基于电压与功率分布特性的新能源场站等值建模方法,该方法避免了对场站详细模型暂态仿真结果的依赖性,经过仿真验证可获得以下结论:

1) 采用道路矩阵存储新能源场站拓扑信息便于进行拓扑转化、集电线路等值参数计算与故障期间场站内电压分布情况计算,可用于批量计算场站中复杂拓扑的集电线路等值参数,有较好的工程实用价值。

2) 本文提出了新能源场站电压分布计算方法与等值集电线路参数计算方法,利用潮流结果与故障数据即可根据场站拓扑计算电压分布情况、等值参数与待补偿功率。不同故障类型与电压跌落程度下的仿真结果表明,本文所提方法在暂态过程中具有更好的等值效果。

参考文献

- [1] 王大兴, 宁妍, 汪敬培, 等. 构建新型电力系统背景下的微电网鲁棒简化建模[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 148-157.
WANG Daxing, NING Yan, WANG Jingpei, et al. Robust simplified modeling of microgrid in the context of constructing new power systems[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 148-157.
- [2] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116-123.
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering
- [3] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491.
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(4): 484-491.
- [4] 赵军, 张敏, 张世锋, 等. 计及碳交易和新能源不确定性的多微电网合作运行优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 62-71.
ZHAO Jun, ZHANG Min, ZHANG Shifeng, et al. Optimization strategy of multi-microgrid cooperative operation considering carbon trading and renewable energy uncertainties[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 62-71.
- [5] 王正宇, 朱林, 黄师禹, 等. 基于高斯函数-最大熵展开的风电并网系统概率潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 91-98.
WANG Zhengyu, ZHU Lin, HUANG Shiyu, et al. Probabilistic load flow calculation based on Gaussian function-maximum entropy expansion for a wind power integration system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 91-98.
- [6] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2151-2163.
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Developing trend of power system simulation and analysis technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2151-2163.
- [7] ALI M, ILIE I, MILANOVIC J V, et al. Wind farm model aggregation using probabilistic clustering[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 309-316.
- [8] 王彤, 王潇桐, 韩梓畅, 等. 分布式调相机暂态特性分析与暂态功角稳定性机理研究[J/OL]. 电工技术学报: 1-16[2024-08-02]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232014>.
WANG Tong, WANG Xiaotong, HAN Zichang, et al. Research on transient characteristic analysis and transient stability mechanism of distributed condenser[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-16[2024-08-02]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.232014>.
- [9] 韩平平, 林子豪, 夏雨, 等. 大型光伏电站等值建模综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 39-47.
HAN Pingping, LIN Zihao, XIA Yu, et al. Review on equivalent modeling of large-scale photovoltaic power

- plant[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(4): 39-47.
- [10] 薛翼程, 张哲任, 徐政. 适用于短路故障分析的风电场动态等值建模方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 327-335.
XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng. Dynamic equivalent model of wind farm for short-circuit faults analysis[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(5): 327-335.
- [11] 吴志鹏, 裴建华, 李银红, 等. 基于低电压穿越功率特性的双馈风电场多机等值方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 95-103.
WU Zhipeng, PEI Jianhua, LI Yinhong, et al. Multi-machine equivalent method for DFIG-based wind farm based on power characteristic of low voltage ride-through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 95-103.
- [12] WANG T, HUANG S, GAO M, et al. Adaptive extended Kalman filter based dynamic equivalent method of PMSG wind farm cluster[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2908-2917.
- [13] 郑子萱, 宋东徽, 谢琦, 等. 考虑撬棒与直流卸荷协同保护动作特性的双馈风电场通用等值建模方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12[2024-03-14]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.230167.
ZHENG Zixuan, SONG Donghui, XIE Qi, et al. A general equivalent modeling method for DFIG wind farms considering the coordinated action characteristics of crowbar and chopper protection[J]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2024-03-14]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.230167.
- [14] 王增平, 杨国生, 汤涌, 等. 基于特征影响因子和改进BP算法的直驱风机风电场建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2604-2615.
WANG Zengping, YANG Guosheng, TANG Yong, et al. Modeling method of direct-driven wind generators wind farm based on feature influence factors and improved BP algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2604-2615.
- [15] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(二): 机电暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2190-2202.
SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (II): electromechanical transient model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2190-2202.
- [16] 李东晟, 沈沉, 吴林林, 等. 考虑初始风速与机端故障稳态电压跌落程度的直驱风机故障响应特性分类及其判别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1247-1260.
LI Dongsheng, SHEN Chen, WU Linlin, et al. Study on fault response characteristics classification and discriminant method of PMSG considering initial wind speed and drop degree of terminal fault steady-state voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1247-1260.
- [17] 林子豪. 大型光伏电站等值建模与电压控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
LIN Zihao. Research on equivalent modeling and voltage control of large photovoltaic power plant[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [18] 林俐, 潘险险, 张凌云, 等. 基于免疫离群数据和敏感初始中心的 K-means 算法的风电场机群划分[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5461-5468, 5722.
LIN Li, PAN Xianxian, ZHANG Lingyun, et al. The K-means clustering algorithm for wind farm based on immune-outlier data and immune-sensitive initial center[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5461-5468, 5722.
- [19] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 162-169.
MI Zengqiang, SU Xunwen, YANG Qixun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [20] 韩佶, 苗世洪, 李力行, 等. 基于多视角迁移学习的风场内机群划分及等值风场参数综合优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4866-4881.
HAN Ji, MIAO Shihong, LI Lixing, et al. Wind turbines clustering in wind farm based on multi-view transfer learning and synthetic optimization of parameters in equivalent wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4866-4881.
- [21] 高兆. 光伏阵列参数辨识方法及电站等值模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
GAO Zhao. Study on parameter identification algorithms of PV array and equivalent model of PV power station[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [22] 赵凯, 侯玉强. 基于自组织映射神经网络 K-means 聚类算法的风电场多机等值建模[J]. 浙江电力, 2019, 38(8): 30-36.
ZHAO Kai, HOU Yuqiang. Multi-machine equivalent modeling of wind farms using SOM-based K-means clustering[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(8): 30-36.
- [23] 崔晓丹, 李威, 李兆伟, 等. 适用于机电暂态仿真的大型光伏电站在线动态等值方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 21-26.
CUI Xiaodan, LI Wei, LI Zhaowei, et al. An online dynamic equivalent method for large scale photovoltaic

- power plant suitable for electromechanical transient stability simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 21-26.
- [24] 晁璞璞. 双馈型风电场的机电暂态等值建模方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
CHAO Pupu. Research on electromechanical transient equivalent modeling of DFIG-based wind farms[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [25] 夏玥, 李征, 蔡旭, 等. 基于直驱式永磁同步发电机组的风电场动态建模[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1439-1445.
XIA Yue, LI Zheng, CAI Xu, et al. Dynamic modeling of wind farm composed of direct-driven permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1439-1445.
- [26] 董文凯, 任必兴, 王海风, 等. 适用于系统次同步振荡分析的风电场等值建模方法综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 33-43.
DONG Wenkai, REN Bixing, WANG Haifeng, et al. Small-signal equivalent modeling methods of the wind farm and its application in sub-synchronous oscillations analysis of grid-connected wind power systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 33-43.
- [27] 金宇清, 黄桦, 鞠平, 等. 用于风电场聚合建模的内部集电网络变换方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 34-41.
JIN Yuqing, HUANG Hua, JU Ping, et al. Collector network transformation methods for wind farm aggregated modeling[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 34-41.
- [28] 陈钊, 夏安俊, 汪宁渤, 等. 适用于低电压穿越仿真的风电场内集电线路等值方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 51-56.
CHEN Zhao, XIA Anjun, WANG Ningbo, et al. Collector network equivalent method of wind farm for low voltage ride through simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 51-56.
- [29] 光伏发电系统建模导则: GB/T 32826—2016[S].
Guide for modeling photovoltaic power system: GB/T 32826—2016[S].
- [30] 风能发电系统—通用电气仿真模型: GB/T 36237—2023[S].
Wind energy generation systems—generic electrical simulation models: GB/T 36237—2023[S].
- [31] 王潇桐, 王彤, 邓俊, 等. 光伏逆变器机电暂态模型的控制模式及参数一体化辨识策略[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3547-3558.
WANG Xiaotong, WANG Tong, DENG Jun, et al. Control mode and parameter integration identification strategy of photovoltaic inverter electromechanical transient model[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3547-3558.
- [32] LI Botong, ZHENG Dingchuan, LI Bin, et al. Analysis of low voltage ride-through capability and optimal control strategy of doubly-fed wind farms under symmetrical fault[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 585-599.
- [33] 田雨果, 王彤, 邢其鹏, 等. 计及虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统暂态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 52-59.
TIAN Yuguo, WANG Tong, XING Qipeng, et al. Transient stability analysis of a photovoltaic generation system considering virtual inertia control and low voltage ride-through[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 52-59.
- [34] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [35] 常鲜戎, 赵书强. 电力系统暂态过程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [36] 徐玉琴, 刘丹丹. 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 108-114.
XU Yuqin, LIU Dandan. Equivalence of wind farms with DFIG based on two-step clustering method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 108-114.
- [37] 古庭赞, 杨骐嘉, 林呈辉, 等. 基于单机等值与选择模态分析的风电场等值建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 102-111.
GU Tingyun, YANG Qijia, LIN Chenghui, et al. A wind farm equivalent modeling method based on single-machine equivalent modeling and selection modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 102-111.

收稿日期: 2024-03-28; 修回日期: 2024-08-02

作者简介:

郑天悦(1994—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源电力系统分析和建模; E-mail: ty_zheng0720@163.com

邓俊(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源建模、电力系统稳定分析; E-mail: d.jone@qq.com

王彤(1985—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制。E-mail: hdwangtong@126.com

(编辑 张颖)