

考虑机网动态交互作用的光伏场群等值建模

潘学萍¹,王卫康¹,黄桦²,梁伟¹,陈海东¹,雍成立¹

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:光伏场群等值建模是研究新能源电力系统动态特性的基础。提出了综合考虑光伏电源自身动态以及机网动态交互作用的光伏场群等值建模策略。基于电力系统微分代数方程,讨论了光伏电源与电力系统间的动态交互作用,强调了光伏场站端口电压是机网交互的关键因素。仿真分析了不同电压跌落程度下光伏电源的动态,指出变流器控制策略是影响光伏电源自身动态的主导因素。基于此,进一步提出了考虑机网交互作用的光伏场群动态分群方法及建模流程。最后通过仿真算例表明,与现仅有基于光伏电源自身动态的分群方法相比,进一步考虑机网交互作用可显著提高光伏场群的等值建模精度。

关键词:光伏场群;动态等值;电压跌落;电压波动

中图分类号:TM615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202209018

0 引言

在构建清洁低碳、安全高效能源体系的大背景下,电力系统中新能源发电占比逐步提高,电力电子设备数量激增,现代电网动态特性发生了深刻变化^[1-4]。电力系统的仿真分析依赖于准确的模型和参数,现代大电网中由于新能源机组数量众多、机组结构复杂、参数不透明等原因,进行详细建模不仅会引入累计误差,而且易造成“维数灾”^[5]。动态等值建模在保证动态特性基本一致的前提下,可显著降低系统的仿真规模和计算工作量。

目前新能源场站等值建模常采用多机等值方法。多机分群手段包括基于指标的分群和基于动态相似度的分群2类。指标分群包括风速分群^[6]、桨距角分群^[7]、Crowbar动作分群^[8]、故障前瞬间的转子转速分群^[9]以及状态变量分群^[10]等。文献[11]提出基于广义哈密顿作用量的同调判别依据,并根据能量守恒约束,将作用量判据简化为并网电流比例判据,简化后的判据更适用于工程应用。在动态相似度分群方面,文献[12]提出基于短路电流的特征信息,建立短路电流包络线轨迹相似度的评价指标进行双馈风电机组的分群。文献[13]提出基于有功响应的风电场实用化等值方法。文献[14-15]基于小扰动分析,将风电机组并联系统分为内部模态和外部模态2个群进行动态等值。文献[16]根据不同时间尺度下小扰动简化模型对新能源进行了等值建模,在此基础上,文献[17-18]提出了一种主导模态保持的风

电场自适应等值方法,该方法在不同频段下保留的机组数目不同,有效保持了等值前后系统主导模态不变。文献[19-20]提出综合考虑稳态特性一致性和动态特性一致性的风电场等值方法,并提出了分类辨识和重点辨识相结合多等值机参数辨识策略。然而上述分群方法都从新能源本身的动态特性出发,未计及系统侧特性对新能源动态的影响。

保证等值前后新能源场站动态响应(一般为有功功率和无功功率)的一致性动态等值的基本原则。电力系统是典型的非线性非自治系统,受扰过程中新能源机组的动态不仅与其自身的模型结构和参数有关,还与系统侧各元件的模型与参数相关,新能源场站与电力系统的动态具有强耦合性。文献[21]指出:由于系统侧的模型和运行工况存在很强的随机性和不确定性,背景参数的误差将导致待建模型的参数辨识误差,甚至导致参数不可辨识。通常同一场站内机组地理位置接近、电气距离较小,可认为系统侧动态对站内各机组的影响基本一致。因此对新能源场站进行等值建模时,可忽略系统侧动态带来的场内各机组间特性的差异;然而当多个新能源场站的电气距离较远、系统动态对各场站的影响差别较大时,新能源场群的等值建模需计及系统侧动态的影响。

为此,本文提出了综合新能源机组自身动态及机网交互作用的新能源场群等值建模方法。由于光伏(photovoltaic, PV)电源动态由变流器控制策略主导,且其在低电压穿越(low-voltage ride through, LVRT)期间的控制策略与正常状态下的不同,因此常根据光伏电源是否进入LVRT进行分群。同时,系统侧对新能源的影响与系统侧各元件的模型与参数直接相关,光伏电源与电力系统的交互作用通过光伏场站的端口电压进行。因此进一步考虑新能源

收稿日期:2022-02-22;修回日期:2022-05-15

在线出版日期:2022-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077061,51837004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077061,51837004)

场站端口电压的动态相似性进行分群,可计及机网间的动态交互作用。本文以光伏场群动态等值为例,提出了考虑机网动态交互作用的光伏场群动态分群方法,进一步按容量加权方法获得等值机组的模型参数,最后通过算例验证了本文方法的可行性和有效性。

1 光伏电源与电力系统的动态交互作用

以图1所示系统为例,设有 n 座光伏场站通过输电线路接入电力系统。图中: U_{PCCi} ($i=1,2,\dots,n$)为第 i 座光伏场站在系统公共连接点(point of common coupling, PCC)的电压; U_{PVi} 、 P_{PVi} 和 Q_{PVi} 分别为第 i 座光伏场站的端口电压、有功功率和无功功率; P_{Vi} 和 Z_{Li} 分别为第 i 座光伏场站及其并网阻抗。

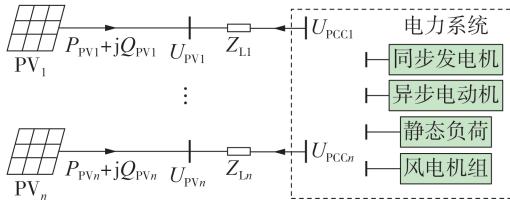


图1 多光伏场站接入的电力系统

Fig.1 Power system integrated with multiple PV stations

图1所示系统的动态可用1组微分代数方程描述为:

$$\begin{cases} \frac{dx_{PV}}{dt} = f_1(x_{PV}, u_{PV}) \\ \frac{dx_s}{dt} = f_2(x_s, u_s) \\ g(x_s, u_s, x_{PV}, u_{PV}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{PV} 为 n 座光伏场站状态变量列向量; u_{PV} 为公共坐标系下 n 座光伏场站端口电压列向量; x_s 和 u_s 分别为系统的状态变量和节点电压列向量; f_1 、 f_2 和 g 为函数符号。光伏发电系统的响应 y_{PV} 表示为:

$$y_{PV} = h(x_{PV}, u_{PV}) \quad (2)$$

式中: $y_{PV} = [P_{PV}, Q_{PV}]^T$, P_{PV} 、 Q_{PV} 分别为公共坐标系下 n 座光伏场站端口的有功功率和无功功率; h 为函数符号。

根据式(1)的代数方程 $g(x_s, u_s, x_{PV}, u_{PV})=0$ 可知,光伏场站端口电压 u_{PV} 受其自身状态变量 x_{PV} 、系统侧状态变量 x_s 和系统侧电压 u_s 的影响。如果各光伏场站的端口电压 u_{PV} 可测量,根据式(1)中 $\frac{dx_{PV}}{dt} = f_1(x_{PV}, u_{PV})$ 可知,此时光伏电源动态只与其自身状态变量 x_{PV} 有关,与系统模型实现解耦。可见光伏电源通过其端口电压 u_{PV} 与系统进行动态交互。

同调等值法是电力系统常用动态等值方法,目前常根据光伏电源有功功率和无功功率受扰轨迹的相似性进行分群。根据上述分析,如果第 i 座光伏场站的端口电压 U_{PVi} 可测量,则该光伏场站与系统动

态解耦,该光伏电源的动态变化由自身状态变量 x_{PVi} 以及端口电压 U_{PVi} 的量测值决定。进行光伏场群等值建模时,可从其自身动态(由状态变量 x_{PVi} 决定)以及端口电压 U_{PVi} (机网动态交互作用)2个方面考虑。

由于光伏电源的本身动态受变流器控制方式主导,同时LVRT期间的控制策略与常规控制不同,为此在分析光伏电源本身的动态时,可以根据其是否进入LVRT进行分群。其次考虑机网动态交互作用时,可根据各光伏场站端口电压的动态相似性,将动态特性相似的机组进行分群。综合考虑2种方法的分群,可得光伏场群的最终分群结果。

2 考虑机网动态交互作用的光伏场群分群方法

2.1 光伏电源的动态特性

正常运行状态下,光伏电源的变流器采用功率外环以及电流内环的双环控制策略。当电网侧受到大扰动导致光伏场站端口电压跌落较深时,光伏电源切换至LVRT控制模式。

LVRT期间光伏电源的控制策略^[22]为:

$$I_p = \begin{cases} I_{p,cmd} & U_{PV} > 0.9U_n \\ \min\{I_{p,cmd}, \sqrt{I_{max}^2 - I_q^2}\} & U_{PV} \leq 0.9U_n \end{cases} \quad (3)$$

$$I_q = \begin{cases} I_{q,cmd} & U_{PV} > 0.9U_n \\ k_{q1}(0.9 - U_{PV})I_n & 0.2U_n \leq U_{PV} \leq 0.9U_n \\ k_{q2}I_n & U_{PV} < 0.2U_n \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_p 和 I_q 分别为LVRT期间光伏电源的有功电流和无功电流; $I_{p,cmd}$ 和 $I_{q,cmd}$ 分别为光伏电源在双环控制策略下有功电流和无功电流输出指令; I_{max} 为变流器电流限值,一般取为额定电流的1.1倍; U_n 和 I_n 分别为光伏电源额定电压和额定电流; k_{q1} 和 k_{q2} 为无功电流系数。

以某100 kW光伏场站接入无穷大系统为例,正常运行时该光伏场站的有功功率为63 kW。设 $t=1$ s时在光伏场站出口设置不同电压跌落扰动,故障持续0.2 s后切除。图2为光伏电源的功率响应轨迹(功率为标么值,其基准值为10 kW,后同)。图中: U_{dip} 为光伏电源端口的电压跌落深度。由图可知:当光伏场站端口电压跌落为 $9\%U_n$ (小于LVRT阈值)时,此时光伏电源采用正常的双环控制策略,而当电压跌落大于 $10\%U_n$ 时,光伏电源采用LVRT控制策略,2种控制策略下光伏电源的有功功率和无功功率受扰轨迹相差较大;LVRT期间,光伏电源的有功出力降低,电压越低,有功出力越小,无功出力增加,随着电压跌落程度的增加,光伏电源无功出力先增加,到达最大值后,电压跌落程度越大,无功出力随

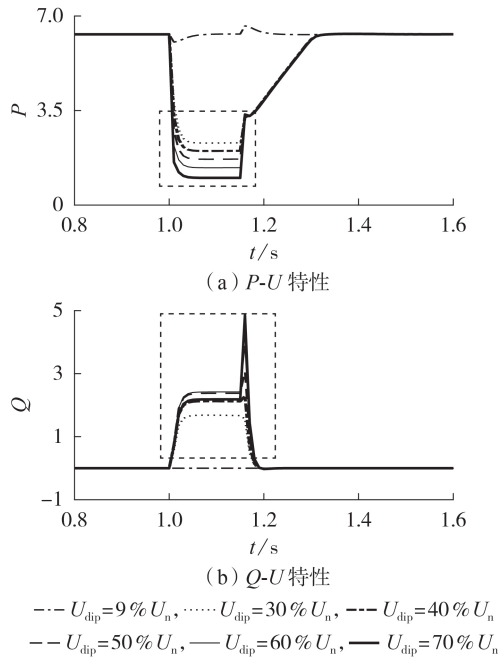


图2 光伏电源的功率-电压特性

Fig.2 Power-voltage characteristics of PV power source

之减小。因此在进行光伏场群的动态等值时,可根据光伏电源是否进入LVRT进行初步分群。

2.2 光伏电源的端口电压及其相似性

受扰电力系统在电源侧与系统侧共同作用下,各光伏场站端口电压的波动特性可能差异较大,端口电压的波动反过来影响光伏电源本身的动态。因此在进行光伏电源的动态分群时,有必要将光伏场站端口电压波动特性差异较大的机组进行分群。

以附录A图A1所示的10机39节点系统为例,在原系统中的负荷节点4、7、8、12、21、24增设光伏场站;为保持原节点的功率平衡,在相应节点上增加了功率相同的恒阻抗负荷;将同步发电机节点33、35改为有功出力相同的光伏场站,通过并联电容保证原节点的无功出力不变。仿真平台为电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)。一般情况下,同一光伏场站内光伏电池的型号、容量、控制方式等相同。为了便于分析,算例中光伏场站采用容量相等的等值电源进行描述。

扰动设置为 $t=0.1$ s节点39发生三相短路故障,接地电抗为0.02 p.u.,故障持续0.2 s后切除,仿真时长为5 s,系统受扰后各光伏场站的端口电压受扰轨迹见附录A图A2。由图可知:由于电网侧动态特性的影响,故障切除后各光伏场站端口电压的波动具有明显的分群特性。具体而言,节点4、7、8、12的电压波动相似度高,可分在一群;同样,节点21、24、33、35的电压波动相似度高(虽然节点33的电压值

明显低于节点21、24、35,但其电压波动性与节点21、24、35基本一致),可分在另一群。

2.3 综合光伏电源自身动态以及机网交互作用的光伏场群分群方法

设受扰期间第 i 座光伏场站的电压跌落深度为 $U_{\text{dip},i}$ 。故障清除后第 i 座光伏场站电压 $U_{\text{PVi}}(t)$ 的表达式如式(5)所示。

$$U_{\text{PVi}}(t) = \bar{U}_{\text{PVi}} + \tilde{U}_{\text{PVi}}(t) \quad (5)$$

式中: $\bar{U}_{\text{PVi}}$ 和 $\tilde{U}_{\text{PVi}}(t)$ 分别为故障清除后第 i 座光伏场站的电压稳态值和波动值。

定义第 i 座光伏场站和第 j 座光伏场站端口电压波动相似性距离 d_{ij} 的表达式如式(6)所示。

$$d_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k'=1}^K |\tilde{U}_{\text{PVi}}(k') - \tilde{U}_{\text{PVj}}(k')| \quad (6)$$

式中: K 为仿真时长内的采样点总数,仿真时长以受扰后电压波动接近于稳态值确定。根据式(6)的电压波动相似性距离,采用类平均法^[23]进行机组分群,如式(7)所示。

$$D(S_{\text{PVeql},m}, S_{\text{PVeql},n'}) = \frac{1}{MN} \sum_{i \in S_{\text{PVeql},m}} \sum_{j \in S_{\text{PVeql},n'}} d_{ij} \quad (7)$$

式中: $D(S_{\text{PVeql},m}, S_{\text{PVeql},n'})$ 表示等值机群 $S_{\text{PVeql},m}$ 和 $S_{\text{PVeql},n'}$ 间的电压波动相似性距离的均值; M 和 N 分别为等值机群 $S_{\text{PVeql},m}$ 和 $S_{\text{PVeql},n'}$ 内光伏场站总数。

综合电压跌落深度及动态电压相似性的光伏场群分群方法如下:①仿真获得系统受扰后各光伏场站出口电压受扰轨迹;②计算受扰期间第 i 座光伏场站的端口电压跌落深度 $U_{\text{dip},i}$,将进入LVRT的光伏场站分在一群,其余分在另外一群;③根据式(5)计算故障清除后电压波动曲线,进一步根据式(7)计算光伏场站端口电压的波动相似性,据此对光伏场群进行进一步分群;④分析上述2种分群结果的交集,根据该交集获得光伏场群的分群数目及分群结果。

3 参数聚合

本文按照同步发电机同调等值法对网络进行化简^[14]。光伏场站进行机群等值时,采用按容量加权法对光伏电源各模块参数进行聚合。以参数 θ 为例,其加权结果 θ_{eq} 为:

$$\begin{cases} \theta_{\text{eq}} = \sum_{k \in \{c\}} \rho_k \theta_k \\ \rho_k = S_k / \sum_{k \in \{c\}} S_k \end{cases} \quad (8)$$

式中: c 为某一光伏场群; S_k 为光伏场群 c 内第 k 座等值光伏场站的额定功率。

4 算例分析

仍以附录A图A1所示的10机39节点系统为例,扰动设置为 $t=0.1$ s节点39发生三相短路故障,通

过仿真获得系统受扰轨迹。基准容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

定义等值机模型的均方根误差 E_1 和绝对误差 E_2 分别为:

$$E_1 = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{k'=1}^K \left(\frac{|y(k') - y'(k')|}{y_0} \right)^2} \quad (9)$$

$$E_2 = |y(k') - y'(k')| \quad (10)$$

式中: y_0 为等值前稳态运行点的功率; $y(k')$ 和 $y'(k')$ 分别为等值前、后系统的受扰轨迹。

4.1 部分光伏电源进入 LVRT

设置 2.2 节的相同扰动, 根据附录 A 图 A2 所示的各光伏场站端口电压受扰轨迹。首先分析故障期间的电压跌落程度, 可得光伏场站 (节点 7、8) 的电压跌落值大于 $10\% U_n$, 进入 LVRT; 其余场站故障期间电压跌落都小于 $10\% U_n$, 未进入 LVRT。因此根据是否进入 LVRT 进行分群时, 可将光伏场站 (节点 7、8) 分在同群, 其余场站分在另外一群。进一步分析各光伏场站受扰后端口电压波动相似性, 根据式 (6)、(7) 计算得到波动相似性距离 D , 部分光伏场站进入 LVRT 时的分群结果如图 3 所示。

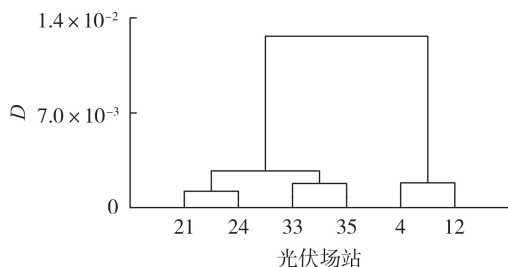


图3 部分光伏场站进入 LVRT 时分群结果

Fig.3 Clustering results when part of PV stations enter LVRT

根据图 3, 光伏场站 4 和 12 的电压波动相似性距离很小, 可分为一群; 同理光伏场站 21 和 24、33 和 35 间的电压波动相似性距离也较小, 可各自分为 1 群, 同时场站 21、24 以及场站 33、35 这 2 群间的电压波动相似性距离也较小, 因此在选择较少分群的情况下可将场站 21、24、33、35 分在一群。

综合各光伏场站在受扰期间电压跌落程度以及受扰后电压波动相似性的分群结果, 该系统最终分群结果为 3 群: 光伏场站 7、8 为群 1; 光伏场站 4、12 为群 2; 光伏场站 21、24、33、35 为群 3。根据上述分群结果, 采用同调母线法^[24]将同群内光伏场站聚合为等值电源, 光伏场站分成 3 群后的等值电路如附录 A 图 A3 所示。进一步根据式 (8) 将群内机组进行参数聚合, 获得各等值机模型的参数值。

为验证该分群结果的可行性, 在上述相同扰动下, 仿真获得光伏场群等值前后系统中, 边界节点

2、9、27 的电压受扰轨迹及其绝对误差 E_2 , 以及边界线路 3-2、8-9、17-27 的功率受扰轨迹及其绝对误差 E_2 。限于篇幅, 图 4 仅给出节点 27 的电压 U_{27} 以及线路 17-27 的功率 (P_{17-27} 、 Q_{17-27}) 受扰轨迹及其绝对误差 E_2 , 其余见附录 A 图 A4 (图中电压、功率和绝对误差 E_2 均为标幺值, 后同)。表 1 给出了仅根据 LVRT 分群以及采用本文方法分群下, 基于等值机模型的边界节点和边界线路的均方根误差 E_1 (E_1 为标幺值, 后同)。从图 4、A4 和表 1 可以看出: 本文分群方法的等值机模型误差均小于仅根据 LVRT 分群的误差, 因此进行光伏场群等值建模时, 计及电压波动相似性可提高模型的等值精度。

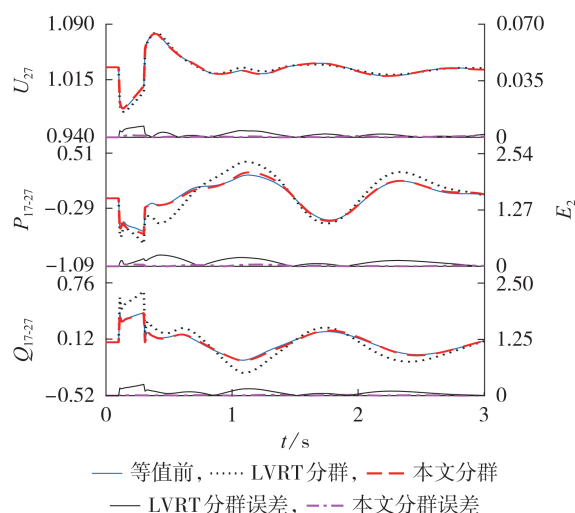


图4 部分光伏场站进入 LVRT 下受扰轨迹及绝对误差

Fig.4 Disturbed trajectories and absolute error when part of PV stations enter LVRT

表 1 部分光伏场站进入 LVRT 时不同等值模型的均方根误差

Table 1 Root mean square error of two clustering methods when part of PV stations enter LVRT

轨迹	E_1		提升精度
	LVRT 分群	本文分群	
U_2	0.0084	0.0030	0.0054
U_9	0.0150	0.0040	0.0110
U_{27}	0.0099	0.0025	0.0074
P_{3-2}	0.1533	0.0447	0.1086
P_{8-9}	3.7961	0.9406	2.8555
P_{17-27}	3.2148	0.6144	2.6004
Q_{3-2}	0.2450	0.0536	0.1914
Q_{8-9}	0.5484	0.1131	0.4353
Q_{17-27}	0.6920	0.0889	0.6031

4.2 所有光伏场站进入 LVRT

故障仍设置为 $t=0.1 \text{ s}$ 时节点 39 发生三相短路故障, 此时接地电抗设为 0, 各光伏场站端口电压的受扰轨迹见附录 A 图 A5。可以看出: 故障期间所有光伏场站的端口电压跌落深度都大于 10% , 即所有

光伏电源都进入 LVRT。

根据故障清除后电压波动相似性对光伏场站进行分群,由式(6)、(7)计算得到电压波动相似性距离,如图5所示。由图可知:光伏场站的最终分群数为2,具体为光伏场站4、7、8、12为群1,光伏场站21、24、33、35为群2。

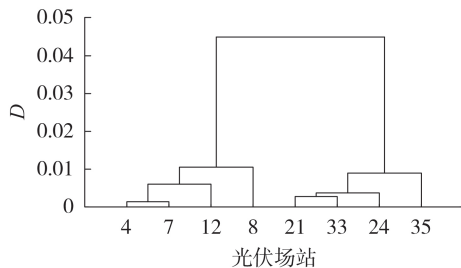


图5 所有光伏场站进入LVRT时的分群结果

Fig.5 Clustering results when all PV stations enter LVRT

将同群内光伏场站进行参数聚合,获得等值机模型各参数。在相同扰动下,仿真获得等值前后边界节点2、9、27的电压轨迹及其绝对误差 E_2 以及边界线路3-2、8-9、17-27的功率轨迹及其绝对误差 E_2 。限于篇幅,图6仅给出了节点27的电压受扰轨迹及其绝对误差,线路17-27的有功功率和无功功率受扰轨迹及其绝对误差,其余轨迹见附录A图A6。表2给出了仅根据LVRT分群以及采用本文方法分群下,基于等值机模型的边界节点和边界线路的均方根误差。从图6、A6和表2可以看出:当故障后所有光伏场站都进入LVRT时,本文方法的等值机模型误差仍旧小于仅根据LVRT的分群结果。这说明了考虑电压波动相似性分群可提高光伏场群等值建模的精度。

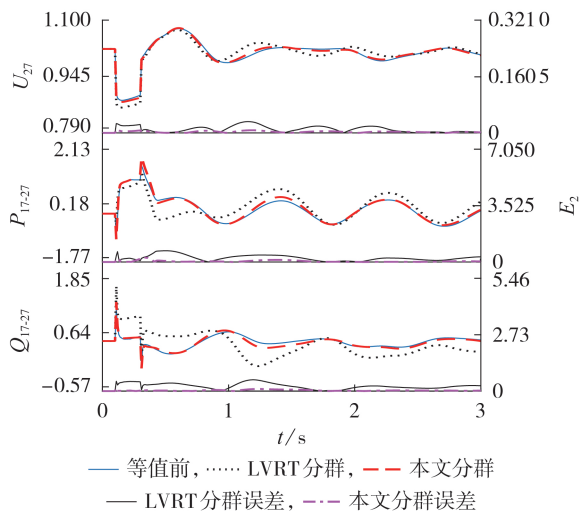


图6 所有光伏场站进入LVRT时受扰轨迹及绝对误差

Fig.6 Disturbed trajectories and absolute error when all PV stations enter LVRT

表2 所有光伏场站进入LVRT时不同等值模型的均方误差

Table 2 Root mean square error of two clustering methods when all PV stations enter LVRT

轨迹	E_1		提升精度
	基于 LVRT 分群	本文方法	
U_2	0.0411	0.0156	0.0255
U_9	0.0678	0.0288	0.0390
U_{27}	0.0472	0.0139	0.0333
P_{3-2}	0.4999	0.1853	0.3146
P_{8-9}	15.3001	6.3296	8.9705
P_{7-27}	8.0776	1.8702	6.2074
Q_{3-2}	0.7546	0.3839	0.3707
Q_{8-9}	2.1261	0.9199	1.2062
Q_{7-27}	2.1751	0.3478	1.8273

5 结论

本文针对光伏场群等值建模问题,提出了综合考虑机组本身动态以及机网动态交互作用的光伏电源分群方法。首先从影响光伏电源自身动态特性的因素出发,提出根据光伏电源是否进入LVRT的分群方法。然后从光伏电源与电网的交互作用出发,提出进一步考虑光伏场站端口电压动态相似性的分群方法。算例表明,与现仅有基于LVRT光伏电源动态分群方法相比,进一步考虑机网动态交互作用的分群可显著提高光伏场群的动态等值精度。

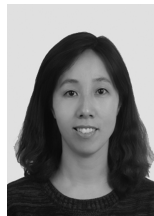
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(12): 1-11,53.
LIU Zhongjian,ZHOU Ming,LI Zhaohui,et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(12):1-11,53.
- [2] 文云峰,杨伟峰,林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):211-222.
WEN Yunfeng,YANG Weifeng,LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):211-222.
- [3] 王怀远,何培灿,江岳文,等. 基于估测惯量计算的低频减载方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):51-56,63.
WANG Huaiyuan,HE Peican,JIANG Yuewen,et al. Under-frequency load shedding scheme based on estimated inertia[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):51-56,63.
- [4] BADAL F R,DAS P,SARKER S K,et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems,2019,4(8):1-27.
- [5] 程改红,陆韶琦,邵冲,等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术,2017,41(6):1919-1926.
CHENG Gaihong,LU Shaoqi,SHAO Chong,et al. A high efficiency modeling method for electromagnetic transient simulation

- tion of large scale AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1919-1926.
- [6] 曹娜, 于群. 风速波动情况下并网风电场内风电机组分组方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 42-46.
CAO Na, YU Qun. A grouping method for wind turbines in a grid-connected wind farm during wind speed fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 42-46.
- [7] 米增强, 苏勋文, 余洋, 等. 双馈机组风电场动态等效模型研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 72-77.
MI Zengqiang, SU Xunwen, YU Yang, et al. Study on dynamic equivalence model of wind farms with wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 72-77.
- [8] 吴志鹏, 曹铭凯, 李银红. 计及Crowbar状态改进识别的双馈风电场等值建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 603-613.
WU Zhipeng, CAO Mingkai, LI Yinhong. An equivalent modeling method of DFIG-based wind farm considering improved identification of Crowbar status[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 603-613.
- [9] 陈树勇, 王聪, 申洪, 等. 基于聚类算法的风电场动态等值[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 11-19, 24.
CHEN Shuyong, WANG Cong, SHEN Hong, et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 11-19, 24.
- [10] 颜湘武, 李君岩. 基于主成分分析法的直驱风电场分群方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 127-133.
YAN Xiangwu, LI Junyan. Grouping method of direct drive wind farm based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 127-133.
- [11] 廖书寒, 查晓明, 黄萌, 等. 适用于电力电子化电力系统的同调等值判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2589-2598, 2827.
LIAO Shuhan, ZHA Xiaoming, HUANG Meng, et al. Coherency criterion applicable to power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2589-2598, 2827.
- [12] 欧阳金鑫, 刁艳波, 郑迪, 等. 基于电流轨迹相似度的双馈风电机组电磁暂态同调分群方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2896-2904.
OUYANG Jinxin, DIAO Yanbo, ZHENG Di, et al. A clustering method of coherent generators during electromagnetic transient process based on similar degrees of current trajectories for doubly fed wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2896-2904.
- [13] 晁璞璞, 李卫星, 金小明, 等. 基于有功响应的双馈型风电场实用化等值方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1639-1646, 1900.
CHAO Pupu, LI Weixing, JIN Xiaoming, et al. An active power response based practical equivalent method for DFIG wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1639-1646, 1900.
- [14] DU W J, DONG W K, WANG H F, et al. Dynamic aggregation of same wind turbine generators in parallel connection for studying oscillation stability of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4694-4705.
- [15] 董文凯, 王洋, 王海风. 用于小信号稳定性分析的风电机群单机等值模型[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1241-1250.
DONG Wenkai, WANG Yang, WANG Haifeng. Single-machine equivalent model of a group of wind turbine generators for small-signal stability analysis[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1241-1250.
- [16] HE X Q, GENG H, YANG G. Dynamic equivalent modeling of wind power plants for various timescale small signal stability analyses[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [17] 何君毅, 周瑞涵, 王康, 等. 主导模态保持的风电站自适应等值方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 28-36.
HE Junyi, ZHOU Yuhuan, WANG Kang, et al. Self-adaptive equivalence method for wind farm with maintained dominant mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 28-36.
- [18] 周瑞涵, 王冠中, 王康, 等. 用于风电场小干扰稳定性分析的结构保持等值方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 133-140.
ZHOU Yuhuan, WANG Guanzhong, WANG Kang, et al. Structure-retained equivalent method for small signal stability analysis of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 133-140.
- [19] 黄桦, 陆宇烨, 潘学萍, 等. 基于限幅环节动作时间的直驱永磁风电场等值建模[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 88-94.
HUANG Hua, LU Yuye, PAN Xueping, et al. Equivalent modelling of the DDPMG-based wind farm based on action time clustering of limiting component[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 88-94.
- [20] 潘学萍, 戚相威, 梁伟, 等. 综合模型聚合和参数辨识的风电场多机等值及参数整体辨识[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 124-132.
PAN Xueping, QI Xiangwei, LIANG Wei, et al. Multi-machine equivalence and global identification of wind farms by combining model aggregation and parameter estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 124-132.
- [21] 郝丽丽, 薛禹胜, 张广明, 等. 背景参数的不确定性对参数识别的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 10-13.
HAO Lili, XUE Yusheng, ZHANG Guangming, et al. Influence of background parameter uncertainty on parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 10-13.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光伏发电系统建模导则: GB/T 32826—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 司守奎, 孙玺菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 426-436.
- [24] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 335-339.

作者简介:



潘学萍

潘学萍(1972—),女,教授,博士,通信作者,研究方向为新能源电力系统建模与分析(E-mail: xueping_pan@hhu.edu.cn);

王卫康(1997—),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电系统建模(E-mail: 1414168268@qq.com);

黄桦(1990—),女,讲师,博士,研究方向为电力电子化电力系统建模、分析与控制(E-mail: hua.h@njit.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第109页 continued on page 109)

wer Automation Equipment, 2022, 42(2): 106-111.

[22] 徐敏锐, 李云, 卢树峰, 等. 基于D-S证据组合规则的双模型融合局部放电模式识别方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 153-159.

XU Minrui, LI Yun, LU Shufeng, et al. Recognition method of partial discharge pattern based on double models fusion with D-S evidence combination rule[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 153-159.

作者简介:

王玉荣(1981—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为电



王玉荣

力系统电压稳定、最优化理论、时间序列分析(E-mail: wangyurong@seu.edu.cn);

朱奕飞(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为含新能源电力系统电压稳定分析(E-mail: zhuyifei@seu.edu.cn);

汤 奕(1977—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、新能源并网、电网信息物理融合系统(E-mail: tangyi@seu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Intelligent fault source identification method for high-voltage trip-off of wind turbines considering transient waveform characteristics

WANG Yurong¹, ZHU Yifei², TANG Yi¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Nantong Power Supply Company, Nantong 226000, China)

Abstract: The large-scale high-voltage trip-off (HVTO) of wind turbines has an impact on the power quality and the safe stability operation of the power system. A fault source identification method for HVTO of wind turbines is proposed, which can be used as a support to fastly remove the fault by protection devices to reduce the impact on the power system brought by HVTO of wind turbines. Firstly, a fault characteristic index system is constructed to reflect the fault source characteristic based on the characteristic analysis of output waveform on HVTO of wind turbines. Secondly, the original index system is sorted out by Gini coefficient and maximum relevance and minimum redundancy (Gini-mRMR) method. Finally, the weights and initial deviation values of back propagation (BP) neural network are optimized by genetic algorithm, ant colony optimization algorithm, and particle swarm optimization algorithm (GA-ACO-PSO) to guarantee the accuracy of fault source identification. A case study is conducted in the Northwest Power Grid, which verifies the validity of the proposed method. Compared with the traditional machine learning method, the proposed method has better performance of fault source identification.

Key words: high-voltage trip-off; fault source identification; index system; Gini coefficient; mRMR method; BP neural network

(上接第85页 continued from page 85)

Equivalent modeling of PV station groups considering dynamic interaction between PV and power grid

PAN Xueping¹, WANG Weikang¹, HUANG Hua², LIANG Wei¹, CHEN Haidong¹, YONG Chengli¹

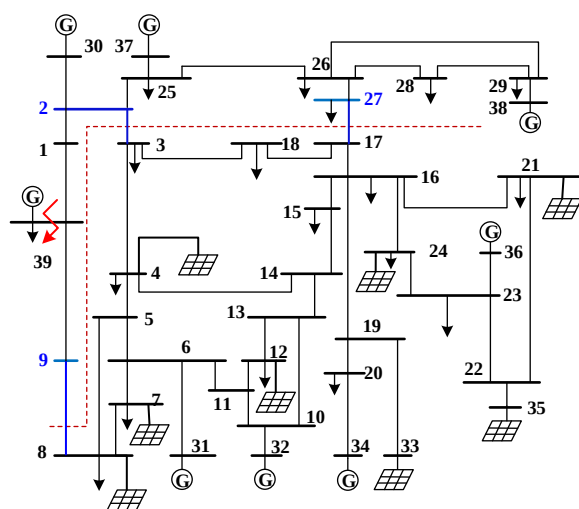
(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Equivalent modeling of photovoltaic (PV) station groups is the basis for studying the dynamic characteristics of new energy power system. An equivalent modeling strategy for PV station groups that comprehensively considers the PV power source dynamic behavior and the dynamic interaction between PV power source and power system is proposed. Based on the differential algebraic equations of power system, the dynamic interaction between PV power source and power system is discussed, and it is emphasized that the terminal voltage of PV station is the key factor of the interaction between PV power source and power system. The dynamics of PV power source under different voltage dip degrees are simulated, which shows that the converter control strategy is the main factor that affects the PV dynamic behavior. Based on this, the dynamic grouping method and modeling procedure of PV station groups considering the interaction between PV power source and power system are proposed. Finally, a simulation example shows that compared with the existing dynamic grouping method based only on the PV dynamic behavior, further considering the interaction between PV power source and power system can significantly improve the equivalence modeling accuracy of PV station groups.

Key words: PV station groups; dynamic equivalence; voltage dip; voltage fluctuation

附录 A



注：虚线以上为研究区域，虚线以下为待等值区域。

图 A1 10 机 39 节点系统

Fig.A1 10-generator 39-bus system

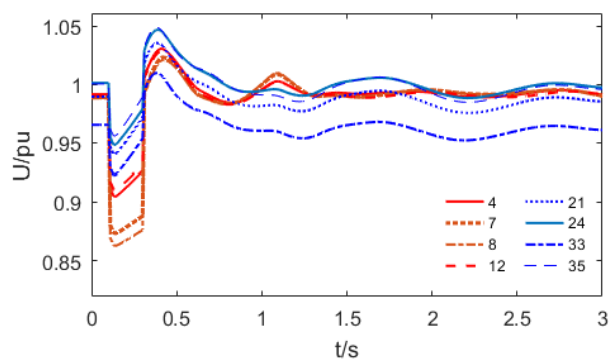


图 A2 光伏电源端口电压

Fig.A2 Terminal voltage of PV stations

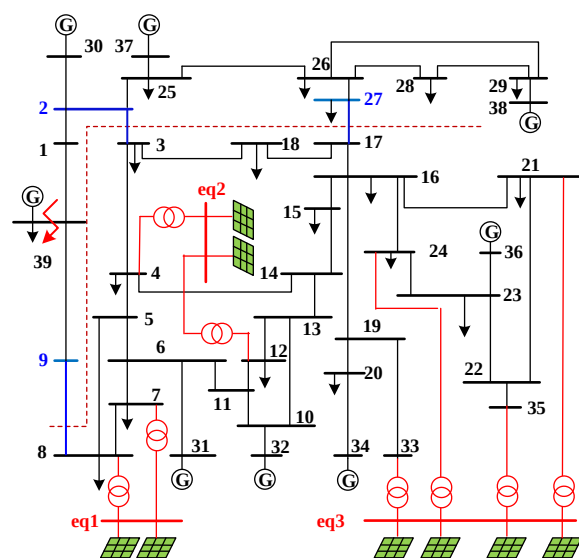


图 A3 光伏场站分成 3 群后的等值电路

Fig.A3 Equivalent circuit under 3 clusters of PV stations

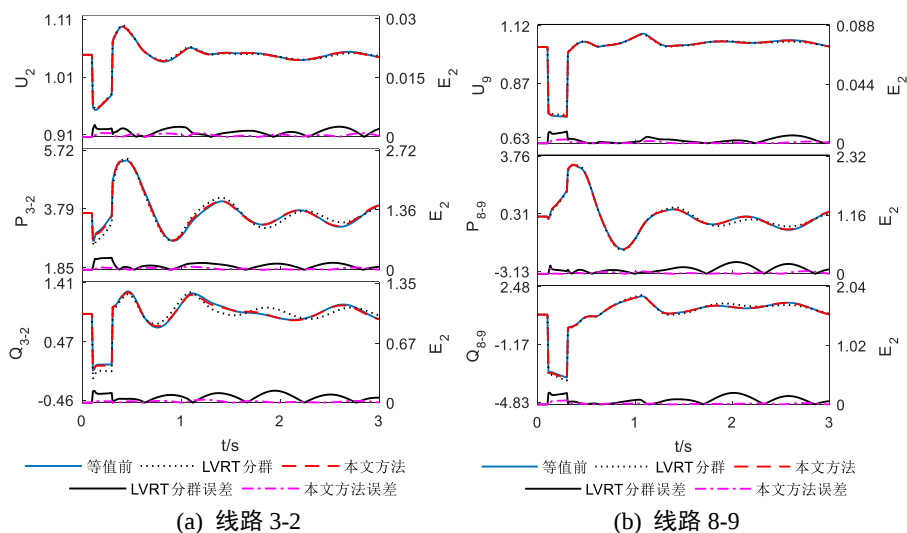


图 A4 部分光伏电源进入 LVRT 下等值误差

Fig.A4 Equivalent model error when part of PV stations enter LVRT

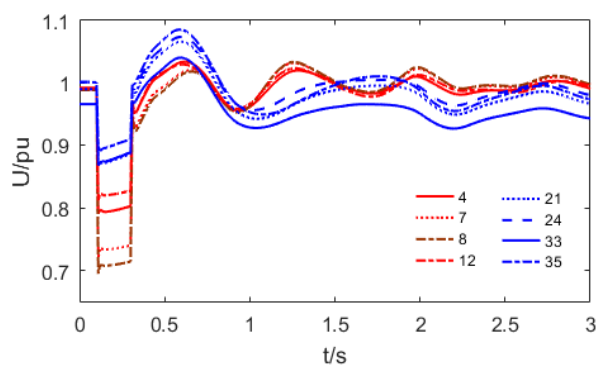


图 A5 所有光伏电源进入 LVRT 时光伏场站端口电压响应

Fig.A5 Responses of terminal voltage at each PV station when all PV stations enter LVRT

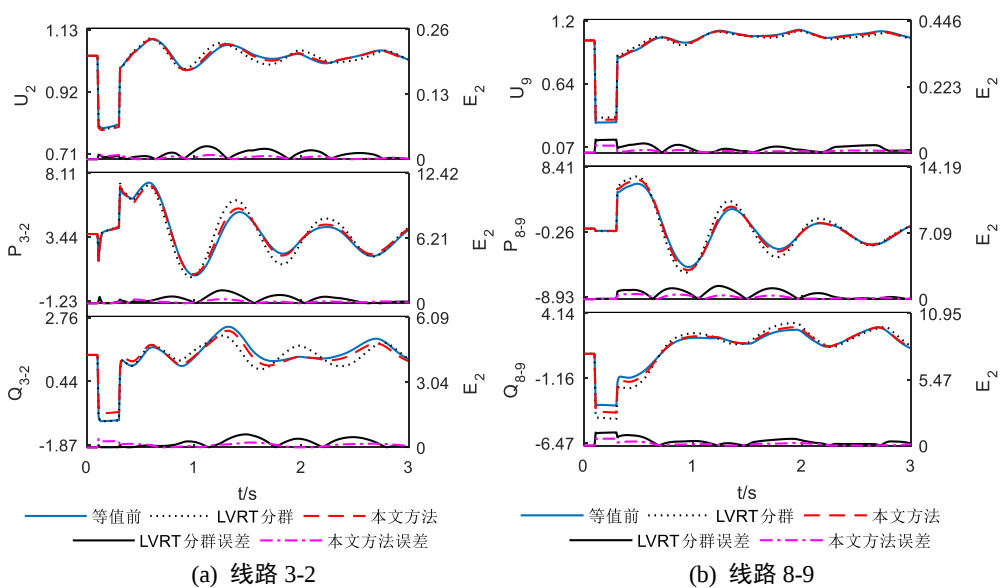


图 A6 所有光伏场站进入 LVRT 时等值误差

Fig.A6 Equivalent error when all PV stations enter LVRT