风电场集电网络等值模型结构分析及参数辨识

孙超强1,潘学萍1,潘生云1,李 威2,朱 玲2,陈舒蕴1

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:风电场集电网络等值建模的难点在于如何获得结构简单、普适性强且精度较高的模型结构。针对该问题,首先采用REI等值方法构建了集电网络等值模型结构。其次针对该REI等值模型存在结构复杂、参数较多且难以辨识的缺点,基于理论分析提出了集电网络简化等值模型的构建方法,并通过时域仿真验证了所提风电场集电网络等值模型的可行性。最后以某实际风电场为例,采用粒子群优化算法对集电网络等值模型进行了参数辨识。进一步将参数辨识值与解析值进行了对比,结果表明所提风电场集电网络等值模型有较好的精度和适应性。

关键词:风电场;集电网络;分群;动态等值;参数辨识 中图分类号:TM 614 文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008031

0 引言

随着千万千瓦级风电基地的陆续建成,大规模 风电机组集中并网给电力系统安全稳定运行带来巨 大挑战^[1]。构建能够准确描述大规模风电场整体特 性的聚合模型,是研究高比例风电系统运行和控制 的基础^[2],集电网络等值是风电场动态等值的重要 内容。文献[3-4]中的仿真结果表明,当故障点离风 电场出口较近时,风电机组的动态运行对集电网络 等值阻抗较敏感,如果集电网络等值参数不准确,将 导致较大的动态误差,因此对集电网络精确等值尤 为重要。

最早进行集电网络等值建模的是美国可再生能 源国家实验室^[5],在假设每台风电机组输出电流相 等的基础上,根据集电网络消耗功率不变为准则计 算集电网络的等值阻抗,同时将所有支路的对地导 纳合并作为等值对地导纳。该方法的缺点在于当风 电机组的运行状态差别较大时,电流相等的假设将 引起较大误差。

文献[6]提出了集电网络的单阻抗等值法和并 联变换法。单阻抗等值法的困难在于:①无法进行 任意分群下的集电网络等值;②将风电机组看成电 压源,但实际上每台风电机组的已知量为功率。并 联变换法以等值前后风电机组机端电压的幅值和相 位不变为原则,将机组之间的混联结构变为纯并联 结构,可实现任意位置上机组的聚合,但无法保证等 值前后网络损耗的一致性^[7]。文献[8]通过网络化 简方法,将混联结构的集电网络聚合为T型结构的

收稿日期:2020-03-22;修回日期:2020-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51837004);国家电网 公司科技项目(400-201940418A-0-0-00)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51837004) and the Science and Technology Project of SGCC(400-201940418A-0-0-00) 等值网络。文献[9-11]提出以等值前后机端电压与 风电场出口间的电压差相等为原则计算集电网络等 值阻抗。该方法可以进行任意位置的参数等值,但 等值阻抗随机组运行状态的变化而变化,同时也无 法保证等值前后网损一致。文献[12]提出了一种适 用于低电压穿越的风电场内集电线路等值方法,该 方法计算得到等值阻抗的参数恒定,不随机组运行 状态的变化而变化,便于实际应用,且低电压穿越期 间的无功功率拟合精度高。但该方法依赖于低电压 穿越期间的控制策略。综上,目前风电场多机等值 时集电网络的等值方法尚未形成共识。

电力网络等值的经典方法包括 REI(Radial, Equivalent,Independent)等值法和WARD等值法^[13-14], 这 2 种方法都是通过保证等值前后公共连接点 (PCC)处的电压和功率不变为原则进行网络等值, 常用于电力系统的网络化简,同样也适用于集电网 络的等值建模,其缺点在于等值结构复杂、参数多。

为解决上述问题,本文在现有 REI等值法的基础上,根据风电场集电网络参数的特点,对集电网络 REI等值模型做进一步化简,在此基础上提出了集 电网络的简化等值模型结构。等值模型的参数获取 既可通过解析方法得到,也可通过辨识方法获取。由于风速及扰动的随机性,风电场内机组的分群具 有不确定性,采用解析方法需要不断更新集电网络 等值模型参数,工作量大;而参数辨识方法不能保证 所有参数都能够可辨识。本文采用辨识结果与解析 方法进行了集电网络等值模型的参数获取,并对参 数辨识误差进行讨论。

1 基于REI等值法的集电网络等值建模

1.1 REI 等值法

REI等值法^[13]常用于电力网络等值,本文将其应用于风电场集电网络的等值,具体步骤如下。

(1)将同群内各风电机组出口电压的均值作为 等值母线电压,通过理想移相变压器连接。

(2) 对外网进行高斯消元等值。设外部系统以及风电场的节点导纳矩阵为Y,设下标E和I分别表示要消去和保留的节点集合,可将节点导纳矩阵表示为 $Y = \begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{IE} \\ Y_{EI} & Y_{EE} \end{bmatrix}, Y_{EE}, Y_{II}$ 分别为要消去、保留节点的自导纳; Y_{EI}, Y_{EI} 分别为要消去、保留节点间的互导纳。用高斯消元法消去E中所有节点,得到由I中节点组成的简化网络,等值后的节点导纳矩阵为 $Y_{eq} = Y_{II} - Y_{IE}Y_{EI}$ 。

1.2 基于REI等值法的集电网络等值建模

以图1所示的简单风电场为例进行基于REI等 值法的集电网络等值建模。图中, $W_{TGk}(k=1,2,...,8)$ 为第k台风电机组; T_k 为第k台风电机组的并网变 压器; Z_k 为第k台风电机组的并网阻抗; B_1 — B_3 为系 统母线;①'—⑧'为风电机组并网节点编号。机组 受图1所示2种初始风速的影响。在风向1扰动下, 设机组 W_{TG3} 、 W_{TG4} 、 W_{TG7} 、 W_{TG8} 为群1,其余机组集合为 群2,其等值母线分别为 B_{eq1} 和 B_{eq2} ,通过移相变压器 T_{ak} 连接机组端口电压和等值母线电压,此时系统结 构见附录A图A1。



图 1 风电场布置 Fig.1 Wind farm layout

等值母线电压分别为:

$$\begin{cases} \left| U_{\text{Beq1}} \right| = \sum_{k=3,4,7,8} \left| U'_{k} \right| / 4 \\ \theta_{\text{Beq1}} = \sum_{k=3,4,7,8} \theta'_{k} / 4 \\ \alpha_{k} = U_{\text{Beq1}} / U'_{k} \quad k = 3, 4, 7, 8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left| U_{\text{Beq2}} \right| = \sum_{k=1,2,5,6} \left| U'_{k} \right| / 4 \\ \theta_{\text{Beq2}} = \sum_{k=1,2,5,6} \theta'_{k} / 4 \\ \alpha_{k} = U_{\text{Beq2}} / U'_{k} \quad k = 1, 2, 5, 6 \end{cases}$$

$$(1)$$

其中, U'_{k} 和 θ'_{k} 分别为第k台风电机组的出口电压和 相位; U_{Beq1} 和 U_{Beq2} 分别为等值母线 B_{eq1} 和 B_{eq2} 的端口 电压; θ_{Beq1} 和 θ_{Beq2} 分别为等值母线 B_{eq1} 和 B_{eq2} 的端口 电压相位; α_{k} 为第k台移相变压器的变比。 图 A1 所示系统中共有 11 个节点,分别为节点 ①'一⑧'、母线 PCC、母线 B_{eq1} 和 B_{eq2} 。消去中间节 点①'一⑧'后,可获得以母线 PCC、 B_{eq1} 和 B_{eq2} 为保留 节点的 3 阶节点导纳矩阵 Y_{eq} ,矩阵中各元素的推导 过程见附录 A式(A1)—(A3)。由式(A3)可知,由于 移相变压器的存在,此时节点导纳矩阵 Y_{eq} 不再是对 称矩阵。

附录 B 图 B1 所示系统为根据 Y_{eq} 消去中间节 点后的集电网络等值结构,由于 Y_{eq} 为不对称矩阵, 每条支路上需增加新的移相变压器支路。图中, ①—③为节点编号; T_{eq1} 、 T_{eq2} 分别为群 1 和群 2 中风 电机组的并网变压器; y_{12} 、 y_{13} 和 y_{23} 为支路导纳; y_{10} 、 y_{20} 和 y_{30} 为各节点的对地导纳; α_{12} 、 α_{13} 和 α_{23} 为移相 变压器的移相角。通过附录 B式(B1)—(B4)可知, $[Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}]$

 $\boldsymbol{Y}_{eq} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{\boxplus} \ \boldsymbol{\alpha}_{12} = Y_{21}/Y_{12}, \ \boldsymbol{\alpha}_{13} = Y_{31}/Y_{13}, \ \boldsymbol{\alpha}_{23} = Y_{23}/Y_{13}$

Y₃₂/Y₂₃,即等值模型中移相变压器的移相角大小取 决于节点导纳矩阵的不对称程度。

在获得集电网络等值模型的基础上,还需计算 各等值机组的参数。假设风电场内机组的类型及参 数都相同,因此可按照容量加权法获得各等值机组 的参数,等值机组的风速求取方法参见文献[6]。

2 集电网络简化等值模型的构建

由图 B1 可知,在仅有2机等值的情况下,集电 网络等值模型结构中仅存在机组间、机组与 PCC 间 的阻抗,同时各节点间还存在移相以及对地导纳支 路等,共有9个复参数,即18个参数,较多参数给风 电场等值建模带来巨大的工作量。为获得结构简 单、等值精度较高的集电网络等值模型,下面进一步 对图 B1 中的9个复参数做进一步分析,研究在保证 较高等值精度的前提下等值模型可能的简化形式。

图 B1 中存在 3 个移相变压器移相角 α₁₂、α₁₃和 α₂₃,以支路①-②为例,根据电路理论可将其进一步 等值,等值过程见附录 B 图 B2,具体参数求取方法 见文献[15]。采用相同方法可消去移相变压器参数 θ₂₃和θ₁₃,同时将各对地导纳并联到图 B2 中各原节点 对地导纳,此时图 B1 可进一步等值为图 B3 所示的 等值模型。图中,yⁿ₀(*i*=1,2,3)为移相变压器参数消 除后的节点*i* 对地支路的总导纳。同一风电场内,通 常 PCC、等值机节点的端口电压相差不大,为此可进 一步将这 3 个节点的对地导纳合并,见附录 B 图 B4。

图中,
$$y_0 = \sum_{i=1}^{3} y''_{i00}$$

通常等值母线B_{eq1}和B_{eq2}的电压相差不大,即U_{Beq1} 和U_{Beq2}近似相等,因此可进一步将支路导纳y₂₃忽 略,即得如图2所示的集电网络简化等值模型结构。



图2 集电网络简化等值模型结构

Fig.2 Simplified equivalent model structure of collector network

3 集电网络简化等值模型的参数辨识

当已知风电场中各机组位置信息、网络参数以 及分群方式时,可采用上述解析方法获取集电网络 等值模型中的参数。由于风速以及外界扰动的随机 性,实际风电场的分群具有不确定性,集电网络等值 参数会随着分群的变化而变化。如果每一次都根据 分群结果重新计算集电网络参数,工作量较大。因 此还可采用参数辨识方法获取集电网络等值模型中 的参数。

3.1 参数的轨迹灵敏度

基于辨识方法获取等值模型参数时,首先需已 知各参数是否可以辨识以及是否容易辨识,这些信 息可根据轨迹灵敏度方法获得^[18]。参数的轨迹灵敏 度定义如下:

$$S_{xj} = \frac{\left(r_j(x_1, \dots, x_j + \Delta x_j, \dots, x_m) - r_j(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)\right)/r_{j0}}{\Delta x_j/x_{j0}}$$
(3)

其中, S_{x_i} 为第j个参数 x_j 的轨迹灵敏度; x_{j_0} 为 x_j 的给定 值; $r_j(\cdot)$ 为参数 x_j 观测量函数; r_{j_0} 为参数 x_{j_0} 的观测量; Δx_i 为参数 x_j 的偏差量;m为待辨识参数的总个数。

3.2 参数辨识

基于轨迹灵敏度方法获得参数可辨识性及辨识 难易度的基础上,进一步采用粒子群优化算法进行 参数辨识,其中待辨识参数集合简化等值模型中的 各参数,即集电网络简化等值模型中的支路电阻*R*₁ 和*R*₂,支路电阻*X*₁和*X*₂,以及对地支路的导纳参数*G* 和*B*。参数辨识的目标函数为:

$$\min \frac{1}{K} \sum_{n=1}^{K} \left(\left| P_{\text{sim}}(n) - P_{\text{est}}(n) \right| + \left| Q_{\text{sim}}(n) - Q_{\text{est}}(n) \right| \right) (4)$$

其中,P_{sim}和Q_{sim}为详细模型下的输出功率;P_{est}和Q_{est}为基于参数辨识值的输出功率;K为受扰轨线时间 窗口内总点数。

4 算例分析

4.1 简单算例

基于 MATLAB / Simulink 仿真平台搭建图1 所示 电力系统,集电网络(即电缆线路)的参数设置如下: 电阻为0.2306 Ω / km,电感为2.1 mH / km,对地电 容为 0.26μ F/km。风电场由额定容量为1.5 MW的 双馈型风机组成,其额定电压为575 V,经变比为 575 V / 25 kV 变压器升压后接入系统,风电机组出 $口的变压器阻抗为<math>Z_{zT} = 0.017 + j5.208 \Omega$,风电机组 的间距为0.5 km。设风电场所受风力为风向1,测风 塔位于 W_{TCS} ,考虑尾流效应以及风电机组的地理位 置,计算可得风电机组 W_{TC1} — W_{TC4} 的风速分别为14、 12.93、10.16、8.66 m / s,机组 W_{TC5} — W_{TC8} 与上述风速 分布相同。采用文献[16]中的分群方法,可将机组 W_{TC1} 、 W_{TC2} 、 W_{TC5} 、 W_{TC6} 分为群1,机组 W_{TC3} 、 W_{TC4} 、 W_{TC7} 、 W_{TC8} 分为群2。

根据图1所示系统的潮流结果得到各机组的端口电压(电压幅值为标幺值),见表1。表中给出了当机组间距d增大为原来的5倍和10倍情形下各机组的出口电压值,当机组间距变化时,各机组输入风速及运行点进行相应修正。

表1 不同风电机组间距下的各节点电压值

 Table 1
 Voltage value of each node under different distances among wind power turbines

d∕ km	U_1'	U_2'	U'_3	U_4'	θ_1' / rad	θ_2' / rad	$\theta'_3/\operatorname{rad}$	$\theta_4' / \operatorname{rad}$
0.5	1.022	1.023	1.023	1.023	11.16	11.30	11.25	11.03
2.5	1.021	1.024	1.026	1.027	11.96	12.64	12.92	12.85
5.0	1.019	1.025	1.029	1.030	12.97	14.32	15.02	15.14
注:†	5点⑤-	-⑧的	电压幅	值和相	位分别与	前节点①	-④相答	等。

4.2 REI 等值模型的误差分析

基于 REI 等值法,可获得图 B3 所示的集电网络 等值结构及附录 B表 B1 所示的参数。下面进一步 分析其与原详细模型的误差,研究 REI 等值法的可 行性。

4.2.1 REI等值模型的潮流误差分析

表2 不同机组间距下PCC处参数

 Table 2
 Parameters of PCC under different distances

 among wind turbine generators

d / km	模型	PCC 处 母线电压	P / MW	$\Delta P \ / \ \%$	Q / Mvar	$\Delta Q / \%$	
0.5	详细	1.02∠9.17°	10.79	0.74	0.3413	1.00	
0.5	等值	1.02∠9.16°	10.87	0.74	0.3456	1.20	
2.5	详细	1.02∠9.25°	10.72	0.84	0.5928	1.69	
2.3	等值	等值 1.02∠9.30° 10.81 0.84	0.84	0.5828	1.08		
5.0	详细	1.01∠9.67°	10.63	1.02	0.9069	2 24	
5.0	等值	0.98∠9.98°	10.74	1.05	0.8735	5.54	

由表2可知,尽管机组间距增大,但等值模型与 详细模型的电压、功率的稳态误差都较小,说明REI 等值法具有较高的精度;随着机组间距的增加,等值 模型的误差增大,这是由于机组间距增加时,各节点 电压差别增大,将各机组电压的平均值作为等值机 电压导致的等值模型误差。

4.2.2 REI等值模型的动态误差分析

为了验证集电网络REI等值法在风电场动态等 值时的准确性,在图1所示的PCC处设置20%U_N(U_N 为额定电压幅值)的电压跌落扰动,图3给出了不同 机组间距下,详细模型和等值模型在风电场出口的 有功功率和无功功率响应曲线。由图3可知,即使 风电场内机组间距增大,基于REI等值法的集电网 络等值模型仍有较高的等值精度,这说明了REI等 值法的可行性。





4.2.3 不同运行场景下的适应性分析

设图1所示风电场中的所受风力变为风向2,测风塔测得 W_{TGS} 的风速为14 m/s,根据风电场布置以及尾流效应,设机组 W_{TG1} 、 W_{TG5} — W_{TG8} 为群1,风速均为14 m/s;机组 W_{TG2} — W_{TG4} 为群2,风速均为12.56 m/s。附录C图C1给出了在不同电压跌落程度下详细模型和等值模型在PCC母线处的功率受扰轨迹。由图C1可知,不同运行场景、不同电压跌落程度下,集电网络的等值模型均具有较好的等值效果,说明了REI等值方法的有效性。

4.3 简化等值模型的误差分析

上文分析了 REI 等值模型的可行性,接下来进 一步验证图 2 所示简化等值模型的可行性。以图 1 所示系统为例,假设机组间距为正常情况下的 10 倍,即5 km。根据集电网络等值模型的简化方法, 获得图 2 所示等值模型参数分别为 y₁₂ = 3.967 5 – j9.4277 p.u.,y₁₃ = 8.4337–j47.7723 p.u.,接地导纳y₀ = 0.9–j0.042 p.u.。设t = 0.1 s在母线 B₂处发生三相短 路,持续 0.1 s后消失,改变接地电阻以控制 PCC 母 线处的电压跌落程度。 图4给出了集电网络详细模型、考虑等值母线 间阻抗的简化等值模型(图B3)以及忽略等值母线 间导纳的简化等值模型(图2)在电压跌落至35%U_N 情况下PCC处有功和无功功率受扰轨线。其他电压 跌落场景下的适应性分析见附录C图C2。从图4可 以看出,不同电压跌落程度下,即使不考虑等值母线 间的导纳,其集电网络简化等值模型依旧有较好的拟 合效果,由此也说明图2所示简化模型的可行性。



图4 简化等值模型的适应性分析

Fig.4 Adaptability analysis of simplified equivalent model

4.4 简化等值模型的参数可辨识性

以图2所示的集电网络简化等值模型为例,设 t=0.1 s时母线 B_{eq2} 发生三相接地短路故障,导致其电 压跌落至80% U_N ,以有功功率和无功功率为观测 量,计算该扰动下各参数的轨迹灵敏度,如图5所 示。图中,有功功率P、无功功率Q及参数 R_1 、 R_2 、G、 $B 、 X_1 、 X_2$ 均为标幺值。







识性之间的关系。如果2个及以上参数的轨迹灵敏 度同相(或反相),则这些参数不可区分辨识。从图 5可以看出,参数X₁与X₂的轨迹灵敏度曲线近似同 相,故X₁与X₂无法区分辨识,其余参数皆可辨识。 其原因在于本算例中,等值机1的等效风速位于最 大功率跟踪区,而等值机2的等效风速位于恒功率 区。不同运行区域风电机组动态特性的根本区别在 于桨距角是否动作,而桨距角动态特性直接影响机 组的有功动态,因此等值电阻的轨迹灵敏度也存在 较大差异。附录C图C3给出了当等值机同时运行 于最大功率跟踪区或恒功率区时,等值电阻的轨迹 灵敏度曲线,可以看出此时2台等值机组的电阻轨 迹灵敏度均同相,无法区分辨识。

4.5 简化等值模型的参数辨识

以33台型号相同的双馈型风电机组构成的实际风电场为例,见附录D图D1。该风电场基于 MATLAB/Simulink平台构建,同一馈线上的机组间 距在370~550m之间,纵向馈线间距离为820m,各 台风电机组经箱变由690V升压至35kV,风电场接 入330kV升压站。

风电场内机组、变压器以及集电网络的详细参数见附录D表D1。该地年平均风速为15 m/s,某一时段风速沿图D1所示方向吹入,推力系数取0.8,粗糙常数取0.075。根据各风电机组之间的距离及风向,计算上游机组沿风向在下游机组的尾流半径,进一步估算得到风电场内各机组的风速^[20],见表3。

	Table 3 Results of estimated wind spec	ed
分群 结果	风机编号	风速 / (m•s ⁻¹)
	$W_{TG4}, W_{TG10}, W_{TG15} - W_{TG17}$	12.3596
群1	$\mathrm{W_{TG5}}$, $\mathrm{W_{TG11}}$	11.5871
	$\mathrm{W}_{\mathrm{TG6}}$	10.8629
	$W_{TG1}, W_{TG7}, W_{TG12}, W_{TG18}, W_{TG23}, W_{TG29} - W_{TG33}$	15.0000
群2	$W_{TC2}, W_{TC8}, W_{TC12}, W_{TC10}, W_{TC24} - W_{TC28}$	14.0625

13.1836

表3 风速估算结果

由风速估算结果可将上述风电场分为2个机群。 在此分群下,基于解析法可得等值集电网络参数为: $R_1+jX_1=0.0415+j0.7516\Omega, R_2+jX_2=0.011+j0.2367\Omega$, 对地支路导纳G+jB=0.0002-j0.009S。当t=0.1s 时,设图D1所示升压变压器高压侧发生三相短路故 障,电压跌落至80% U_N ,故障持续0.1s后切除。

由于参数*X*₁与*X*₂无法区分辨识,参数辨识时将 *X*₁+*X*₂作为一个参数进行辨识,灵敏度计算也以参数 *X*₁+*X*₂进行。同时由于各参数对有功功率和无功功 率的轨迹灵敏度数值不同,这里采用有功功率和无 功功率灵敏度的均值来描述各参数的轨迹灵敏度。 上述扰动下在时间段[0.05,0.5] s内各参数轨迹灵 敏度结果见表4(灵敏度值为标幺值)。由表4可知, 参数 X_1+X_2 、参数B的轨迹灵敏度显著大于其他参数,易于辨识;参数 R_1 、 R_2 灵敏度值较小,稍难辨识; 电导参数G的灵敏度最小,较难辨识。

表4 参数的轨迹灵敏度值

Table 4	Sensitivity	value	of	parameters	trajectory
				1	

会粉		灵敏度值	
参奴	Р	Q	(P+Q)/2
R_1	0.0038	0.0077	0.0057
R_2	0.0002	0.0054	0.0028
$X_1 + X_2$	0.0099	0.9200	0.4649
G	0.0001	0.0015	0.0008
В	0.0049	0.8211	0.4130

进一步采用粒子群优化算法进行参数辨识,初 始种群数设为10,学习因子为2,最大迭代次数为 50。由于参数搜索范围对辨识的速度和精度极为关 键,本算例中,先采用文献[5]的方法估算集电网络 总等值阻抗,再根据各等值机的额定容量,按照反比 关系确定各等值阻抗*R*₁+j*X*₁、*R*₂+j*X*₂的初值。对地导 纳参数*G*+j*B*主要由2个部分组成,即等值导纳矩阵 对地支路参数以及消去移相器后的等值对地支路参 数。计算结果表明,起主要作用的是移相器消去时 引起的等值对地支路参数,为此使用该值估算参数 *G*和*B*的初值。参数搜索区间设为上述各参数初始 值的10%~200%。

粒子群优化算法进行参数辨识期间,随着迭代 次数的增加,粒子向全局最优值收敛,若粒子惯性权 重保持不变将使粒子速度过大,收敛会变得困难。 为解决该问题,参数辨识期间随着迭代次数的增加, 采用变权重方法进行。

由于 X_1 与 X_2 无法区分辨识,因此根据辨识 得到的 X_1+X_2 结果,结合等值机组1和等值机组 2 的额定容量,基于 $X_1 = \frac{S_{eq2}}{S_{eq1} + S_{eq2}} (X_1 + X_2), X_2 = \frac{S_{eq1}}{S_{eq1} + S_{eq2}} (X_1 + X_2)$ 估算出 X_1 与 X_2 的数值,其中, S_{eq1}

和Seq2分别为等值机组1和等值机组2的额定功率。

各参数的20次辨识结果以及解析结果见图6及 表5。为便于比较,参数*R*₁、*R*₂、*G*、*B*、*X*₁+*X*₂解析值、 20次辨识方差均采用标幺值,基准值为20次辨识结 果的均值。

从图6和表5可以看出,各参数的辨识均值和解 析值相差不大,辨识效果较好;参数X₁+X₂以及对地 电纳B的20次辨识方差较小,辨识精度高;参数R₁ 的方差次之,辨识精度较高;参数R₂和对地电导G方 差较大,辨识结果比较分散,辨识误差较大。这与表 4的灵敏度结果一致。

4.6 误差分析

4.6.1 潮流误差

附录E表E1给出了基于图D1所示的详细集电



图6 各参数的20次辨识结果

Fig.6 Parameter identification results after 20 times

表5 参数辨识结果及其误差

Table 5 Parameter estimation results and error

参数	解析值	20次辨识方差	均值偏差 / %
R_1	0.9857	0.0033	1.45
R_2	0.9483	0.0186	5.45
G	0.9174	0.0596	9.00
В	0.9646	0.0029	3.67
$X_1 + X_2$	0.9537	0.0028	4.86

网络模型、集电网络简化等值模型(解析值),以及集 电网络简化等值模型(辨识值)下,所有机组总有功 功率及无功功率、PCC处母线电压及有功功率和无 功功率以及集电网络的有功损耗和无功损耗。从表 E1可以看出,集电网络采用等值模型时,PCC处母 线电压、功率与原详细模型相差较小;集电网络的有 功和无功网损也接近。说明集电网络等值模型具有 较高的稳态等值精度。

4.6.2 动态误差

附录E图E1给出了电压跌落至80%U_№扰动下, 基于实际风电场模型、基于简化等值模型解析值以 及基于简化等值模型辨识值下风电场出口有功功率 和无功功率受扰轨线,可以看出,基于解析结果的等 值模型和基于辨识结果的等值模型均具有较好的动 态等值精度。

5 结论

本文在现有集电网络等值方法的基础上,讨论 了基于REI等值方法的集电网络等值。该方法的唯 一前提在于各机组端口电压接近,由于风电场内机 组间距离较短,故电压接近的前提易于满足,本文通 过算例对不同机组间距下等值结果进行了对比验证 了该结论。

针对REI等值模型参数多、模型复杂等问题,本

文对移相变压器参数、对地支路以及等值风电机组 出口间联络支路的简化可能性进行了讨论,并通过 算例验证了简化等值模型的可行性和适应性。

由于风速的随机性、扰动的不确定性,不同场景下的集电网络简化等值模型结构具有较好的适应性,但等值模型参数会随机变化。针对上述问题,本 文提出简化等值集电网络模型参数的辨识方法,首 先基于轨迹灵敏度分析了参数的可辨识性及辨识难 易度,据此确定了待辨识参数;进一步利用粒子群优 化算法对参数进行了辨识。将辨识结果与解析结果 进行了对比,并对参数辨识精度进行了讨论。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 林俐,赵会龙,陈迎,等.风电场建模研究综述[J].现代电力, 2014,31(2):1-10.

LIN Li,ZHAO Huilong,CHEN Ying, et al. Research summary of wind farm modeling[J]. Modern Electric Power,2014,31(2): 1-10.

[2]高澈,牛东晓,罗超,等. 双馈风电场单机与多机等值模型对次 同步振荡特性影响的对比[J]. 电力自动化设备,2018,38(8): 152-157.

GAO Che, NIU Dongxiao, LUO Chao, et al. Comparison of impact on sub-synchronous oscillation characteristics between single- and multi-generator equivalent model in DFIG wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 152-157.

- [3] 晁璞璞,李卫星,金小明.关于双馈风电场动态等值的认识和 探讨[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):194-199.
 CHAO Pupu,LI Weixing,JIN Xiaoming. Views and discussions on dynamic equivalent of DFIG wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):194-199.
- [4] 陆飞,刘其辉,赵亚男,等.基于低电压穿越去磁控制的风电场内部故障等值建模方法[J].电力系统自动化,2016,40(10):24-30,37.
 LU Fei,LIU Qihui,ZHAO Yanan,et al. Equivalent modeling method for wind farm inner fault based on demagnetizing control of low voltage ride through[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(10):24-30,37.
- [5] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, ELLIS A, et al. Equivalencing the collector system of a large wind power plant[C]//2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Canada, Montreal: 2006, IEEE: 18-22.
- [6]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.
- [7] FERNÁNDEZ L M,GARCÍA C A,SAENZ J R,et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3):691-704.
- [8] 谭鹏,杨洪耕,马晓阳,等. 计及风电场侧谐波阻抗影响的谐波 发射水平评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):167-173.
 TAN Peng,YANG Honggeng,MA Xiaoyang, et al. Assessment of harmonic emission level considering influence of harmonic impedance of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(4):167-173.

- [9] 周明,葛江北,李庚银. 基于云模型的DFIG型风电场动态电压 等值方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(5):1097-1105.
 ZHOU Ming,GE Jiangbei,LI Gengyin. Cloud model based DFIG wind farm dynamic voltage equivalence method[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(5):1097-1105.
- [10] 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.
- [11] 张星,李龙源,胡晓波,等. 基于风电机组输出时间序列数据分群的风电场动态等值[J]. 电网技术,2015,39(10):2787-2793.
 ZHANG Xing,LI Longyuan,HU Xiaobo,et al. Wind farm dynamic equivalence based on clustering by output time series data of wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2015,39(10):2787-2793.
- [12] 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.
- [13] 冯永青,李鹏,陈刚,等.基于模型拼接与外网等值的南方 电网在线模型协调方法[J].电力自动化设备,2011,31(7): 101-104.

FENG Yongqing, LI Peng, CHEN Gang, et al. Online model cooperation based on model merging and equivalence technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 101-104.

- [14] 朱琳,葛俊,吴学光,等.一种工程实用的电力系统等值方法
 [J]. 电力自动化设备,2017,37(9):178-184.
 ZHU Lin,GE Jun,WU Xueguang,et al. Power system equivalence for practical engineering[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):178-184.
- [15] 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.

- [16] 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].
- [17] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大 学出版社,2007:120-122.

Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2604-2615.

- [18] 谢会玲,鞠平,罗建裕,等. 基于灵敏度计算的电力系统参数可 辨识性分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(7):17-21.
 XIE Huiling, JU Ping, LUO Jianyu, et al. Identifiability analysis of load parameters based on sensitivity calculation[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(7):17-21.
- [19] 潘学萍,殷紫吟,鞠平,等. 基于短路电流辨识双馈感应发电机 的模型参数[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):27-31.
 PAN Xueping,YIN Ziyin,JU Ping,et al. Model parameter identification of DFIG based on short circuit current[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):27-31.
- [20] 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.

作者简介:



孙超强

孙超强(1995—),男,安徽阜阳人,硕 士研究生,主要研究方向为新能源发电系 统等值建模(E-mail: chaoqiangsun95@163. com);

潘学萍(1972—),女,江苏南京人,教 授,博士研究生导师,主要研究方向为新能 源发电系统建模及其并网分析(E-mail: xueping_pan@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Equivalent model structural analysis and parameter identification of wind farm collector network

SUN Chaoqiang¹, PAN Xueping¹, PAN Shengyun¹, LI Wei², ZHU Ling², CHEN Shuyun¹

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

2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: The difficulty of equivalent modeling of wind farm collector network lies in how to obtain a model structure with simple structure, strong universality and high precision. Firstly, the REI equivalent method is introduced to construct the equivalent model structure of collector network. Secondly, to overcome the short-comings of complex structure, many parameters and difficult in identification of REI equivalent model, a more simplified equivalent modeling method is proposed based on theoretical derivation, and the feasibility of the proposed wind farm collector network equivalent modeling is validated by time simulation. Finally, taking a real wind farm as an example, the parameter identification of the collector network equivalent model is obtained by particle swarm optimization algorithm. The parameter identification values are compared with the analytical results, and the results show that the proposed wind farm collector network equivalent model has better accuracy and adaptability.

Key words: wind farm; collector network; grouping; dynamic equivalence; parameter identification



图 A1 考虑移相变压器后等值母线 Beq1 和 Beq2

Fig.A1 Equivalent bus B_{eq1} and B_{eq1} considering phase-shifter

图 A1 所示系统中节点电压方程列写如下:

$$\begin{bmatrix} I_{Z} \\ I_{P} \\ I_{B_{eql}} \\ I_{B_{eql},Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ZZ} & Y_{ZP} & Y_{Z,B_{eql}} & Y_{Z,B_{eq2}} \\ Y_{PZ} & Y_{PP} & 0 & 0 \\ Y_{B_{eql},Z} & 0 & Y_{B_{eql},B_{eql}} & 0 \\ Y_{B_{eq2},Z} & 0 & 0 & Y_{B_{eq2},B_{eq2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Z} \\ U_{P} \\ U_{B_{eql}} \\ U_{B_{eql}} \end{bmatrix}$$
(A1)

其中, I 和 U 分别为电流、电压列向量, 下标 Z 表示中间节点①'~⑧', 下标 P 表示 PCC 节点, 下标 B_{eq1}和 B_{eq2}分别表示等值母线1和2。各分块矩阵构成如下:

$$\mathbf{Y}_{zz} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{zz,11} & \mathbf{Y}_{zz,22} & \mathbf{Y}_{zz,33} & \mathbf{Y}_{zz,34} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{zz,32} & \mathbf{Y}_{zz,33} & \mathbf{Y}_{zz,34} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{zz,43} & \mathbf{Y}_{zz,44} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{zz,55} & \mathbf{Y}_{zz,56} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{zz,76} & \mathbf{Y}_{zz,77} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{zz,76} & \mathbf{Y}_{zz,77} & \mathbf{Y}_{zz,78} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{zz,76} & \mathbf{Y}_{zz,77} & \mathbf{Y}_{zz,88} \end{bmatrix} , \quad \mathbf{Y}_{pz} = \mathbf{Y}_{pz}^{T},$$

$$\mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{3, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{7, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{Y}_{8, \mathbf{B}_{qel}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{\mathbf{B}_{qel}, z} = \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}}^{T}, \quad \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{1, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{Y}_{2, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{7, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{Y}_{8, \mathbf{B}_{qel}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{\mathbf{B}_{qel}, z} = \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}}^{T}, \quad \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{1, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{Y}_{1, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{Y}_{7, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{Y}_{8, \mathbf{B}_{qel}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{\mathbf{B}_{qel}, z} = \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}}^{T}, \quad \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{1, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{Y}_{1, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{Y}_{1, \mathbf{B}_{qel}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{\mathbf{B}_{qel}, z} = \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y}_{\mathbf{B}_{qel}, z} = \mathbf{Y}_{z, \mathbf{B}_{qel}}^{T}$$

从式 (A3) 可以看出: $Y_{12} \neq Y_{21}, Y_{13} \neq Y_{31}, Y_{23} \neq Y_{32}$, 即节点导纳矩阵不对称。





图 B1 消去中间节点后的等值系统结构

Fig.B1 Equivalent system structure after eliminating the intermediate node 图 B1 所示系统中,设 $I_1 - I_3$ 、 $U_1 - U_3$ 分别为节点①—③的注入电流及节点电压,则节点① —③的 KCL 方程如下:

$$\boldsymbol{I}_{1} = y_{12} \left(\boldsymbol{U}_{1} - \frac{\boldsymbol{U}_{2}}{\theta_{12}} \right) + y_{13} \left(\boldsymbol{U}_{1} - \frac{\boldsymbol{U}_{3}}{\theta_{13}} \right) + y_{10} \boldsymbol{U}_{1} = \left(y_{12} + y_{13} + y_{10} \right) \boldsymbol{U}_{1} - \frac{y_{12}}{\theta_{12}} \boldsymbol{U}_{2} - \frac{y_{13}}{\theta_{13}} \boldsymbol{U}_{3} = Y_{11} \boldsymbol{U}_{1} + Y_{12} \boldsymbol{U}_{2} + Y_{13} \boldsymbol{U}_{3}$$
(B1)

$$I_{2} = y_{12} \left(\frac{U_{2}}{\theta_{12}} - U_{1} \right) + y_{23} \left(U_{2} - \frac{U_{3}}{\theta_{23}} \right) + y_{20} U_{2} + \frac{1}{Z_{\text{Teql}}} U_{2}$$

$$= -y_{12} U_{1} + \left(\frac{y_{12}}{\theta_{12}} + y_{23} + y_{20} + \frac{1}{Z_{\text{Teql}}} \right) U_{2} - \frac{y_{23}}{\theta_{23}} U_{3} = Y_{21} U_{1} + Y_{22} U_{2} + Y_{23} U_{3}$$
(B2)

$$I_{3} = y_{13} \left(\frac{U_{3}}{\theta_{13}} - U_{1} \right) + y_{23} \left(\frac{U_{3}}{\theta_{23}} - U_{2} \right) + y_{30} U_{3} + \frac{1}{Z_{\text{Teq2}}} U_{3}$$

$$= -y_{13} U_{1} - y_{23} U_{2} + \left(\frac{y_{13}}{\theta_{13}} + \frac{y_{23}}{\theta_{23}} y_{23} + y_{30} + \frac{1}{Z_{\text{Teq2}}} \right) U_{3} = Y_{31} U_{1} + Y_{32} U_{2} + Y_{33} U_{3}$$
(B3)

根据式(B3)求得的节点导纳矩阵 $Y_{eq} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}$ 各元素,可得图 3 中各支路导纳参数:

 $\begin{aligned} y_{12} = -Y_{21} \quad , \qquad y_{13} = -Y_{31} \quad , \qquad y_{23} = -Y_{32} \quad ; \qquad y_{10} = Y_{11} + Y_{21} + Y_{31} \quad , \qquad y_{20} = Y_{12} + Y_{22} + Y_{32} - 1/Z_{\text{Teq1}} \quad , \\ y_{30} = Y_{13} + Y_{23} + Y_{33} - 1/Z_{\text{Teq2}} \; \circ \end{aligned}$



图 B2 移相器支路等值示意图 Fig.B2 Phase shifter elimination diagram

移相变压器消去后的对地支路参数为:

$$\begin{cases} y_{10}' = U_2 (1 - 1 \angle \theta_{12}) y_{12} / U_1 \\ y_{20}' = U_1 (1 - 1 \angle \theta_{12})^* y_{12} / U_2 \end{cases}$$
(B4)



图 B3 移相器消去后的等值模型

Fig.B3 Equivalent model after elimination of phase shifter



图 B4 集电网络简化等值模型结构

Fig.B4 Simplified equivalent model structure of collector network

表 B1 REI 等值集电网络参数

Table 1	B1	Equival	lent	parameter	values	of	col	lector	networ	k	by	REI	met	hod
---------	----	---------	------	-----------	--------	----	-----	--------	--------	---	----	-----	-----	-----

机组距 离	<i>y</i> ₁₂ /p.u.	<i>y</i> ₁₃ / p.u .	<i>y</i> ₂₃ /p.u.	$\theta_{12}/\text{p.u.}$	$\theta_{13}/\text{p.u.}$	θ_{23} /p.u.	<i>y</i> ₁₀ / p.u .	<i>y</i> ₂₀ /p.u.	y ₃₀ /p.u.
0.5km	13.69-j87.86	10.82-j116.4	2.21-j21.53	-0.0064	0.0093	-0.0263	0.01+j0.01	0.01	0.01-j0.01
2.5km	7.76-j23.80	9.79-j67.17	1.11-j33.50	0	0.1922	-0.2733	0.23	0.17-j0.2	0.07
5km	3.96-j9.43	8.43-j47.77	2.67-j30.39	0.0338	0.5386	-0.6712	0.46-j0.03	0.33-j0.002	0.11+j0.01



附录 C

图 C1 不同电压跌落程度下等值模型的拟合效果

Fig.C1 Dynamics of equivalent model and detailed model under different voltage dip degrees



Fig.C2 Adaptability analysis of simplified general equivalent model



(a) 两等值机都位于最大功率跟踪区



图 C3 等值电阻 R1 和 R2 的轨迹灵敏度

Fig.C3 Trajectory sensitivity of R_1 and R_2

附录 D



图 D1 某实际风电场布置图 Fig.D1 Layout of actual wind farms

表 D1 风电场详细参数

Table D1	Parameters	values c	of	wind	farms

变量	数值	变量	数值		
基准功率	1.5MW		Rs=0.023p.u.		
风轮机直径	77m		<i>R</i> r=0.016p.u.		
发电机额定功	1.5MW	华山和	L		
率/电压	690V	反电机	<i>L</i> m=2.9p.u.		
切入风速	6m/s		Ls=0.18p.u.		
切出风速	30m/s		<i>L</i> r=0.16p.u.		
变压器阻抗(归	0.3402Ω	在山网级山桃	<i>R</i> =0.0221Ω/km		
算到高压侧)	0.0324H	果电网给电缆	$L=1.331\times10^{-4}$ H/km		

附录 E

Table E1 PCC power and its error under different models										
य	5县	送细档刑	等值模型	等值模型						
<u> </u>	く里	F 细候至	(解析值)	(辨识值)						
$\dot{U}_{ m PCC}$ /p.u.		1.405∠22.92	1.403∠22.90	1.403∠23.06						
有功功率	$P_{\rm PCC}/{\rm MW}$	48.08	48.07	48.22						
及损耗	$\Delta P/MW$	0.50	0.47	0.46						
无功功率	$Q_{\rm PCC}/{ m Mvar}$	-1.222	-1.224	-1.262						
及损耗	$\Delta Q/Mvar$	1.222	1.224	1.262						

表 E1 不同集电网络模型下 PCC 功率及其损耗 Table E1 PCC power and its error under different mode



图 E1 80% U_N 电压跌落下简化模型和详细模型的功率受扰轨线

Fig.E1 Disturbed power trajectories based on detailed model and simplified equivalent models under $80\% U_N$ voltage dip