

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230553

风电场站单机聚合模型倍乘元件阻抗参数设计

王晗玥, 许建中

(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: 现有较大规模风电场站等值模型中常采用倍乘方式实现机组聚合, 以节省建模与仿真计算等资源。针对风电场站单机聚合模型倍乘元件在风电场建模中应用广泛、参数设置缺少规律性的现状, 对倍乘元件阻抗参数在风电场等值建模中的影响展开研究。首先, 以 PSCAD 软件官网的经典倍乘元件入手, 分析各个自定义阻抗参数间的关系与重要程度。其次, 搭建风电场基准测试模型并展开等值聚合, 通过参数遍历测试, 研究倍乘元件阻抗参数对等值误差的影响机理, 依据稳态运行点等值误差、仿真步长两个方面的限制, 提出倍乘元件阻抗参数选择方法。最后, 选取稳态运行点、三相电压跌落、宽频振荡 3 个工况, 对影响机理与推荐参数展开验证。从等值误差的角度, 对大型风电场建模仿真中倍乘元件阻抗的参数设计提供了参考建议。

关键词: 风电场; 单机聚合模型; 倍乘元件; 阻抗参数; 等值误差

Design of impedance parameters of a multiplier element in an aggregation model of a single wind turbine of a wind farm

WANG Hanyue, XU Jianzhong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: In existing equivalent models of large-scale wind farms, multi-wind turbines are often aggregated using a multiplier element to save modeling and simulation computing resources. The multiplier element of a single-wind turbine aggregation model of wind farm is widely used in wind farm modeling, but the parameter setting lacks regularity. Thus this paper studies the influence of multiplier element impedance parameters on wind farm equivalent modeling. First, it starts with a multiplier element on the official website of PSCAD to analyze the relationship and importance of each self-defined impedance parameter. Second, a reference test model of a wind farm is built and equivalent aggregation is carried out. Through a parameter traversal test, the influence mechanism of impedance parameters of multiplier elements on equivalent error is studied. From the limitations of steady-state operating point equivalent error and simulation time step, the method of impedance parameter selection of the multiplier element is proposed. Finally, three operating conditions of steady-state operating point, three-phase voltage dip and broadband oscillation are selected to verify the influence mechanism and recommended parameters. Some suggestions are provided for the parameter setting of the impedance of the multiplier element in modeling and simulation of large wind farms in terms of equivalent error.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277094).

Key words: wind farm; aggregation model of a single wind turbine; multiplier element; impedance parameters; equivalent error

0 引言

近年来我国风电、光伏等可再生能源快速增

长, 电力系统作为能源枢纽, 正在向以新能源为主体的新型电力系统快速转变^[1-4]。仿真建模是支撑新型电力系统认知与研究的重要手段, 出于工程规划建设、实际问题的优化研究等多方面考虑, 针对新型电力系统的建模仿真需求越来越大^[5-7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277094)

我国风力建设发展呈现规模化开发、集中并网和远距离输送的特点, 主要以大规模风电场的形式接入电网^[8-10]。大规模风电场一般包含成百上千台风机, 对每台机组进行详细建模可能引发潮流计算不收敛、计算机平台资源不足等仿真维数灾^[11-12]问题, 故而研究时常采用等值模型来表征整个风电场。现有的风电场等值方法主要从风电场本身的电气特性出发, 对场内机组的参数进行等值聚合, 具体的等值方法有单机法、多机法、复合模型法和数学简化法。单机法将风电场等值为一台风电机组, 具有绝对的计算优势^[13-16], 但仅适用于忽略尾流、时滞效应带来的风速差异仿真^[17-19]; 多机法依据影响因子分群, 对相同群中的风机展开单机等值, 精度较高, 计算复杂度也较大^[18,20-23]; 复合模型法将风电场等值为多台风轮和一台等值发电机, 等值发电机的输入为风轮机械功率的叠加^[24], 数学简化法对风电场进行数学意义上的降阶处理^[25-26], 这两种方法改变了原有风电机组模型的结构, 难以在常用电力系统平台上应用。故现有的主流建模仿真手段仍然为单机法与多机法两种。

在目前较大规模新型电力系统仿真中, 无论是单机法还是多机法, 当风电场的电气参数和控制参数完全相同时, 风电机组单机等值部分常采用倍乘模型处理, 即将一台风电机组的输出电流扩大 n 倍来等效整个风电场的输出^[27], 其他电气参数和控制参数保持不变。如 PSCAD 官网的风力发电机模型 (type4windturbinemodel_1), 采用倍乘方式聚合 100 台风机, 系统总容量为 200 MW; 海上风电经柔直送出模型 (MMC_Offshore_Wind), 两台等值机组分别通过一条电缆将功率传送至柔直换流站, 每台等值机组聚合 90 台风机, 共聚合 180 台, 系统总容量为 950 MVA。两种官网经典模型中的单机聚合模型倍乘元件均有可调参数设置。

这种通过倍乘元件实现风机聚合的建模方式在大规模仿真中被广泛应用, 但已有文献对该元件参数设置的研究较少。文献[28]对比了多种电流源加 RC 阻尼支路的倍乘模型频率扫描结果, 推荐用参数扩容方式实现机组聚合, 但建模过程只简单地对待乘元件参数取值, 并未说明参数设置所遵循的规律或原理; 文献[29]说明无论分群指标如何变化, 对于每个集群都进行单机等值, 会涉及到倍乘元件在模型中的应用, 但其只对单台风电机组的平均聚合参数展开推导, 并未详细研究倍乘元件参数的设置方法; 文献[30]研究发现风电场聚合误差与不同机组间的参数差异相关, 依然从分群算法的角度分析误差来源, 没有考虑到倍乘元件在聚合中的影响。

另外, 部分文献对 RC 支路在电力系统仿真中的作用展开研究^[31-32], 对其抑制数值振荡的功能加以肯定, 但并未对设置不同的 RC 支路参数在风电场聚合中的影响展开详细研究。

本文针对单机聚合模型倍乘元件在风电场建模中应用广泛、参数设置缺少规律性的研究现状, 以 PSCAD/EMTDC 软件官网模型中提供的经典倍乘元件为研究对象, 展开测试与理论探究, 试图为大型风电场建模中倍乘元件的仿真参数设置提供参考。

1 经典单机聚合模型倍乘元件

在现有风力系统建模中, 常采用单机倍乘的方式实现机组扩容, 具体方法为: 单台机组与受控电流源组合以电流倍乘的形式实现多机聚合。本节将针对经典单机聚合模型倍乘元件展开介绍(后文简称为“倍乘元件”)。

1.1 单机倍乘元件基本介绍

倍乘元件中 RC 电路存在的意义主要为数值振荡预防, 也兼有滤波的作用, 维持模型鲁棒性与系统稳定性。

除受控电流源结构外, 倍乘元件有可自定义参数的阻抗设置, 包括具有串并联关系的 R_c 、 C 、 R_p , 倍乘模型示意图如图 1 所示, 其中 i_1 为单台机组出口电流, n 为倍乘系数, 交流电网侧电流大小为 ni_1 。

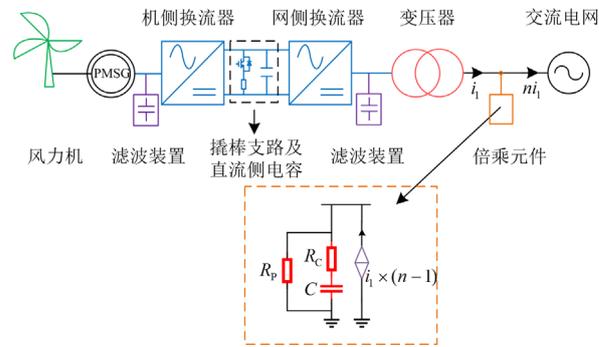


图 1 倍乘元件 A

Fig. 1 Multiplier element A

记 R_c 与 C 的串联值为 Z_c , 如式(1)所示。

$$Z_c = R_c + 1/j\omega C \quad (1)$$

式中, $\omega = 2\pi f$, f 为系统频率值, 参数 R_c 与 C 之间存在一定的耦合关联作用。由 PSCAD 帮助文档可知, 等效电容值满足式(2)。

$$C = \frac{dt}{|Z_c|} \quad (2)$$

式中, dt 为仿真步长。式(2)与欧拉法的离散化仿真公式相关。结合式(1)、式(2)可得

$$dt = C \cdot \sqrt{R_C^2 + 1/(\omega C)^2} = \sqrt{(C \cdot R_C)^2 + 1/\omega^2} \quad (3)$$

由式(3)可知,当仿真步长一定时,参数 R_C 与 C 的乘积为定值,记为

$$C \cdot R_C = k \quad (4)$$

式中, k 为常数。这也是下文遍历测试时,参数调节的基本规则。

1.2 倍乘元件参数重要程度

首先,测试并计算各参数对有功功率、无功功率与电压有效值精度的影响指数,计算方式为:参数对电气量的影响指数=电气量的误差变化量/参数变化量。由于单位无实际意义,只关注数值大小,表征影响程度的大小。

为避免主观调整参数对结果的影响,以官网模型设置参数($R_C = 5 \Omega$ 、 $C = 4 \mu F$ 、 $R_p = 1000 \Omega$)为基准,设置各参数在基准值附近变化,展开针对各参数的单一变量测试,记录每次测试对应的有功、无功、电压误差值,经计算,不同参数对不同电气量精度的影响指数如表 1 所示。

表 1 不同参数对不同电气量精度的影响指数

Table 1 Influence index of different parameters on accuracy of different electrical volume

电气量	R_C	R_p	C
有功功率	1.88×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.36×10^{-4}
无功功率	6.67×10^{-7}	2.94×10^{-6}	7.32×10^{-4}
电压有效值	3.53×10^{-6}	1.77×10^{-6}	6.89×10^{-4}

由表 1 可得,参数 R_p 、 C 影响指数的数量级越高,代表这两个参数对等值误差的影响越大,这为选择 R_p 、 C 两个参数展开测试提供了进一步支撑。

因此,下文对等值误差的研究主要围绕参数 R_p 、 C 展开,综合式(4),在调参过程中,默认参数 R_C 随参数 C 变化。

2 基于等值误差的倍乘元件阻抗参数研究

对于多机系统等值而言,机组聚合过程采用单机倍乘方式实现,倍乘元件的阻抗参数设置对功率、电压等电气量的等值精度均有影响。本节将结合遍历测试结果与理论分析,展开倍乘元件阻抗参数对等值误差的影响研究。

2.1 倍乘元件阻抗参数遍历测试

搭建含 9 台风电机组的仿真测试模型作为基准模型,每台风电机组的额定容量为 5.2 MVA,系统总容量为 46.8 MVA。对基准模型展开等值建模,线路与变压器采用等电压损耗法等值^[33],风电机组采用电流源倍乘法实现单机扩容^[27]。等值前后的风电

场模型如图 2 所示。

等值前后的线路参数如表 2、表 3 所示。

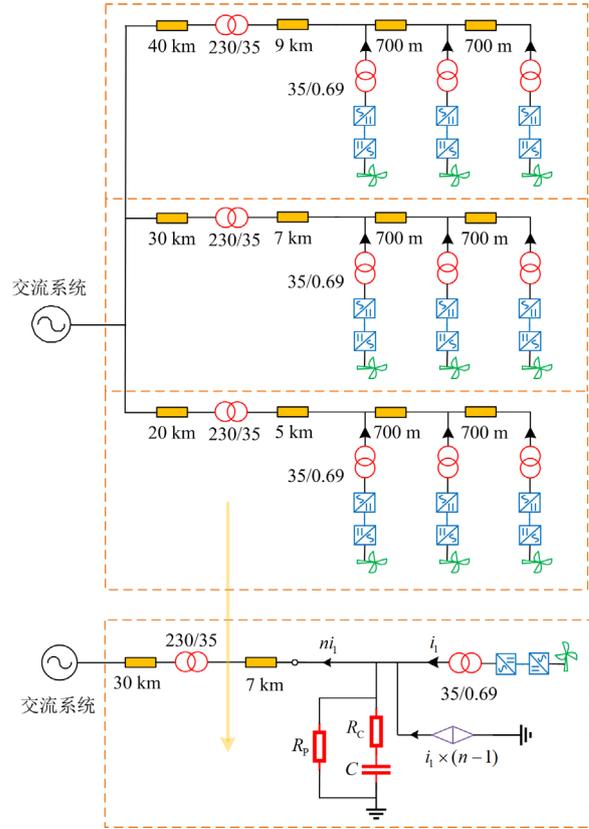


图 2 风电场等值过程

Fig. 2 Equivalence process of wind farm

表 2 基准模型线路参数

Table 2 Line parameter of the reference model

线路参数	长度/km	$R/(\Omega/m)$	$X_L/(\Omega/m)$	$X_C/(M\Omega \cdot m)$
220 kV	40	5.14×10^{-5}	9.71×10^{-5}	28.3
	30	5.14×10^{-5}	9.71×10^{-5}	28.3
	20	5.14×10^{-5}	9.71×10^{-5}	28.3
35 kV	9	7.90×10^{-5}	1.20×10^{-4}	16.75
	7	7.90×10^{-5}	1.20×10^{-4}	16.75
	5	7.90×10^{-5}	1.20×10^{-4}	16.75
	0.7	3.42×10^{-4}	1.58×10^{-4}	26.31

表 3 等值模型线路参数

Table 3 Line parameter of the equivalent model

线路参数	长度/km	$R/(\Omega/m)$	$X_L/(\Omega/m)$	$X_C/(M\Omega \cdot m)$
220 kV	30	1.71×10^{-5}	3.24×10^{-5}	9.43
35 kV	7	2.86×10^{-5}	3.76×10^{-5}	4.95

测试在不同倍乘元件阻抗参数组合下,等值模型并网节点处有功功率、无功功率与电压有效值的稳态运行点最大相对误差,仿真参数设置如表 4 所示。

表 4 风电场模型仿真参数

Table 4 Simulation parameters of wind farm model

参数	数值
系统总容量/MVA	46.8
单机容量/MVA	5.2
并网点电压/kV	35
交流系统电压/kV	220
机组额定电压/kV	0.69
仿真步长/ μs	20
单机模型倍乘系数	9

测试结果见附录 A 表 A1—表 A3。表 A1—表 A3 中的等值误差由颜色区分, 绿色代表等值误差 1%以内, 黄色代表等值误差 1%~3%, 蓝色代表等值误差 3%~5%, 橙色代表等值误差在 5%以上, 灰色区域为模型发散区。考虑到大电阻的断路效应和大电容的低容抗效应, 分别限制测试边界为 50 k Ω 与 200 μF 。

可总结出以下规律, 与基准模型相比:

1) 有功功率、无功功率、电压有效值 3 个电气量与 R_p 、 C 之间的规律基本相同, 在 R_p 较大、 C 较小的范围内(表格右上绿色区域), 等值误差较小;

2) 在 R_p 变大、 C 变小的方向上(指向表格右上趋势), 有功、无功的等值误差先明显变小, 后稍有增大, 电压有效值的等值误差持续变小;

3) 对于无功功率而言, 绿色区间的延展范围更大, R_p 较小、 C 较大的参数组合对应的等值误差也较小;

4) 在 C 较小、 R_p 较大的区域(表格右上角灰色区域)存在模型发散的现象。

2.2 参数设置对等值误差的影响机理研究

由 2.1 节可知, 等值误差受倍乘元件阻抗参数的影响较大, 进一步展开理论分析。倍乘元件整体阻抗关系式如式(5)所示。

$$Z = \frac{(R_c + \frac{1}{j\omega C}) \cdot R_p}{R_c + \frac{1}{j\omega C} + R_p} \quad (5)$$

结合式(4)、式(5)可得

$$Z = \frac{(R_c + \frac{1}{j\omega C}) \cdot R_p}{R_c + \frac{1}{j\omega C} + R_p} R_c \cdot C = k = \frac{\omega^2 k^2 R_p + \omega^2 k C R_p^2 + R_p - j(\omega C R_p^2)}{(\omega k + \omega C R_p)^2 + 1} \quad (6)$$

记倍乘元件阻抗值为 Z_m , 分析倍乘元件参数 R_p 、 C 与整体阻抗 Z_m 的关系, 如图 3 所示。

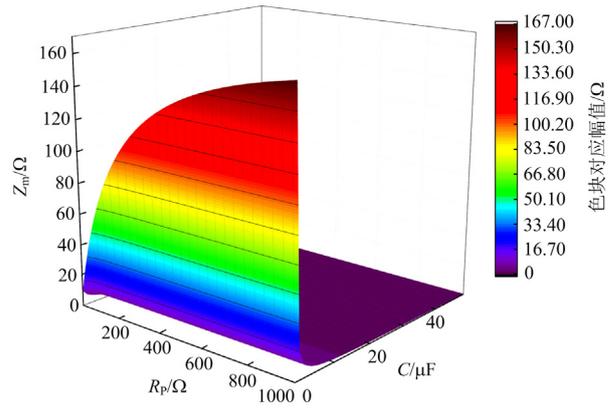


图 3 倍乘元件阻抗

Fig. 3 Impedance of multiplier elements

由图 3 可知, 参数 R_p 越大、 C 越小, 阻抗幅值 Z_m 越大。

对应 2.1 节的规律 1)、2), 在表格右上区域的参数设置组合下, 有功、无功的等值误差较小。倍乘元件阻抗的功率损耗如式(7)所示。

$$\Delta S = \sqrt{3} U_B I = \sqrt{3} U_B \cdot \frac{U_B}{\sqrt{3} Z_m} = \frac{U_B^2}{Z_m} \quad (7)$$

式中: U_B 为倍乘元件接入风力系统点的额定电压; Z_m 为倍乘元件阻抗幅值。当阻抗值 Z_m 较大时, 倍乘元件接地支路的功率损耗 ΔS 减小, 并网点的功率等值精度更高。

对于表 A2 中的无功功率误差而言, 电容 C 对无功功率的影响较大, 电容复功率如式(8)所示。

$$\tilde{S}_C = -j\omega C U^2 \quad (8)$$

式(8)中的负号含义为“发出功率”。电容 C 值越大, 电容复功率越大, 对等值曲线起抬升作用。在测试结果表 A2 中, 当 $R_c = 50 \Omega$ 时, 较小的 C 对应的等值曲线低于基准波形, 等值误差为负值, 随着 C 的增大, 等值曲线抬升, 直至高于基准波形, 等值误差变为正值。同样, 当 $C = 4 \mu\text{F}$ 时, 随着 R_p 的增大, R_p 所在旁路上的大电阻断路效应增强, 功率损耗降低, 使得其对含电容支路的影响变小, 等值误差也由负变正。

由于 $R_p = 50 \Omega$ 取值较小, R_p 所在旁路的功率损耗效应大于电容对无功功率的抬升作用, 故 C 设置为较大值 50 μF 时才能抬升至贴近基准波形, 这解释了规律 3) 的现象。

综合以上分析, 绘制 R_p 、 C 对等值误差的影响示意图, 仍然用色块区分等值误差, 由内到外等值误差逐渐变大, 如图 4 所示。

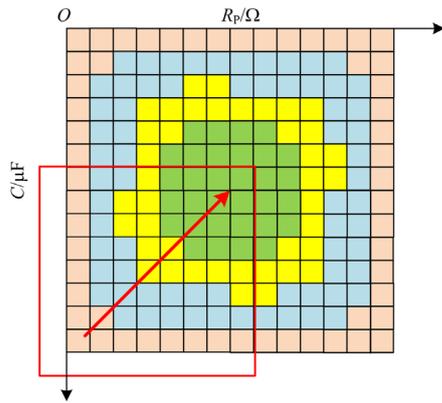


图 4 等值误差示意图

Fig. 4 Diagram of equivalent errors

表 A1—表 A3 测试所得电气量等值误差规律大致处于图 4 的左下区域, 随着箭头指向, 阻抗值增大, 等值精度先升高后稍有降低。

2.3 不同机组数适用性扩展

为提升研究结果的普遍适用性, 本节对倍乘元件的适用性扩展进行研究。分别搭建风电机组台数为 2、20、30 的风电系统, 展开等值聚合测试, 探究等值聚合系数与倍乘元件参数的关系。模型仿真参数设置如表 5 所示。

表 5 风电场模型仿真参数(适用性扩展)

Table 5 Simulation parameters of wind farm model (extensive suitability)

参数	数值
单机容量/MVA	5.2
并网点电压/kV	35
交流系统电压/kV	220
机组额定电压/kV	0.69
仿真步长/μs	10

以含 30 台机组的风电场为例, 展示等值误差测试结果, 详见表 A4—表 A6。

由表 A4—表 A6 可知, 含 30 台机的风力系统等值聚合测试结果仍满足 2.1 节中的规律 1)~4)。且对比表 A1—表 A6 可得, 聚合台数差异对有功功率等值误差影响较大, 主要影响 R_p 的选取; 聚合台数差异对无功功率误差也有一定影响, 对电压有效值等值误差的影响较小。

综合本节测试结果, 以各电气量稳态运行点等值误差 3% 以内为标准, 给出不同台数机组聚合时, 推荐的倍乘元件阻抗参数设置范围, 如表 6 所示。

本节对含 2、9、20、30 台机的风电场分别展开等值建模, 研究倍乘元件阻抗参数对等值精度的影响规律, 以提高研究普适性。然而, 受遍历参数取值间隔、取值上下限等因素限制, 结果可能仍然

具有一定局限性, 展望设计软件运算程序, 建立更为精细的、高运算量的测试支撑。

表 6 倍乘元件阻抗推荐参数

Table 6 Recommended impedance parameters of the multiplier element

机组台数	R_p/Ω	$C/\mu F$
2	5000 及以上	0.5~10
9	1000 及以上	1~30
20	500 及以上	1~30
30	500 及以上	4~30

3 倍乘元件阻抗参数选择方法

本节综合等值误差、仿真步长两方面, 提出倍乘元件阻抗参数选择方法。

3.1 基于等值误差的参数限制

以表 A1、表 A2 为例说明, 关注绿色区域(高精度参数区间), 有功功率的参数 R_p 限制在 5 kΩ 以上, 无功功率的参数 R_p 限制在 500 Ω 以上, 故综合二者应取交集, 即采用有功功率误差限制参数 R_p 设置值, 可以保证二者均在绿色区间, 即有功功率对参数 R_p 的设置要求更严格。

同理, 无功功率与电压有效值对参数 C 的设置要求更严格。考虑到无功功率在表 A2 左下角存在较少的高精度参数组合, 而此时有功功率与电压有效值的等值误差都较大, 即无功功率等值误差对参数的限制作用相对较小, 故将无功功率等值误差作为辅助手段验证已选参数范围, 对已选范围起缩小或保持的作用。

3.2 基于仿真步长的参数限制

表 A1—表 A6 的测试结果均出现模型在某些参数组合下发散的情况, 标注为各表中的灰色区域。采用这些参数组合展开仿真时, 必须减小仿真步长, 才能规避模型发散。

究其原因, 倍乘元件阻抗具有类传输线性质, 其等效阻抗与传输线波阻抗概念类似, 波阻抗表达式为 $Z_C = \sqrt{L_{line}/C_{line}}$ (PSCAD 软件帮助手册), L_{line} 、 C_{line} 分别表示传输线单位长度等效电感和电容。根据传输线波阻抗建模原理可知, 信号在线路上的传播时间 τ [34]为

$$\tau = l\sqrt{L_{line}C_{line}} \quad (9)$$

式中, l 为线路长度。设置仿真步长 $dt \leq \tau$ 为传输线模型仿真的解耦条件, 可保证历史电源信号的传递与更新无误。

结合 1.1 节可知, 在仿真中, 倍乘元件存在与传输线类似的单步长延迟效应, 依据等效电容计算

式(2)可知,在仿真步长一定时,等效阻抗幅值 $|Z_c|$ 增大,等效电容 C 减小;由式(9)可知,等效电容 C 减小,使得仿真信号在同一线路上的传播时间 τ 变短,继而降低了仿真步长上限。

以上可以解释表A1—表A6中右上角参数设置导致的模型失稳现象,右上角参数对应的等效阻抗幅值 $|Z_c|$ 较大,对仿真步长上限的要求更为严格,须降低步长才能恢复模型鲁棒性。

综合3.1节、3.2节,提出一种选择倍乘元件阻抗参数的方法:首先,根据有功功率等值误差限定 R_p 参数设置范围,根据电压有效值等值误差限定参数 C 设置范围;继而,依据无功功率等值误差对所选参数范围展开校验,保留或缩小已选参数区间;最后,检验仿真步长是否满足模型鲁棒性要求。绘制流程图如图5所示。

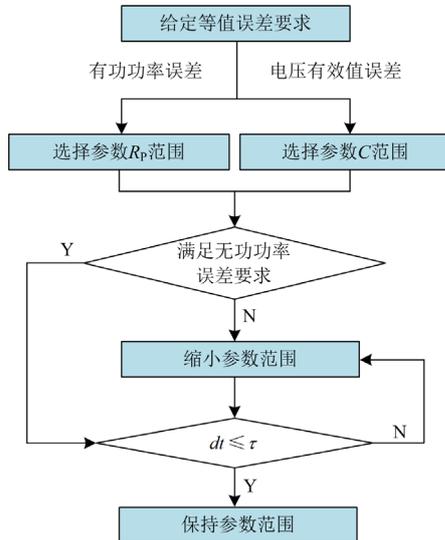


图5 倍乘元件阻抗参数选择方法

Fig. 5 Method for selecting impedance parameters of multiplier element

4 算例测试

本节选取稳态运行点、三相电压跌落、宽频振荡3个工况,验证倍乘元件阻抗参数对等值建模的影响。

4.1 稳态运行点

为验证图4中阻抗值增大,等值精度先升高后稍有降低的结论,对含9台机组的风电场展开等值聚合,分别在表A1、表A2的右上角趋势方向取三组参数,记为A、B、C组。仿真参数设置如表7所示。

测试基准模型与等值模型的稳态运行点无功功率波形图,如图6所示。由表7、图6可知,随着 Z_m 的增大(参数组合向右上角区域移动),等值曲线首先逼近基准曲线,等值误差为负值,逐渐减小;

随着 Z_m 进一步增大,等值曲线越过基准曲线,等值误差变为正值。测试结果与理论分析相一致。

表7 仿真参数(1)

参数	数值
系统总容量/MVA	46.8
单机容量/MVA	5.2
仿真步长/ μ s	20
单机模型倍乘系数	9
仿真时间/s	4
R_p (A组)/ Ω	50
C (A组)/ μ F	10
R_p (B组)/ Ω	100
C (B组)/ μ F	5
R_p (C组)/ Ω	5000
C (C组)/ μ F	4

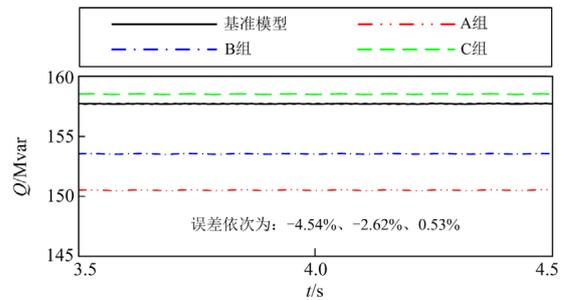


图6 稳态运行点对比

Fig. 6 Comparison of steady-state operating point

4.2 三相电压跌落

由表6可知,聚合机组数为30台时的 R_p 在 30Ω 以上, C 为 $4\sim 30\mu$ F。本节分别采用推荐区间内、外两组参数实现机组等值聚合,对基准模型与等值模型展开对比测试。推荐区间内参数记为A组,推荐区间外参数记为B组。仿真参数设置如表8所示。三相电压跌落对比波形如图7所示。

表8 仿真参数(2)

参数	数值
系统总容量/MVA	156
单机容量/MVA	5.2
仿真步长/ μ s	20
单机模型倍乘系数	30
电压跌落时间/s	5
恢复时间/s	6
R_p (A组)/ Ω	1000
C (A组)/ μ F	5
R_p (B组)/ Ω	100
C (B组)/ μ F	80

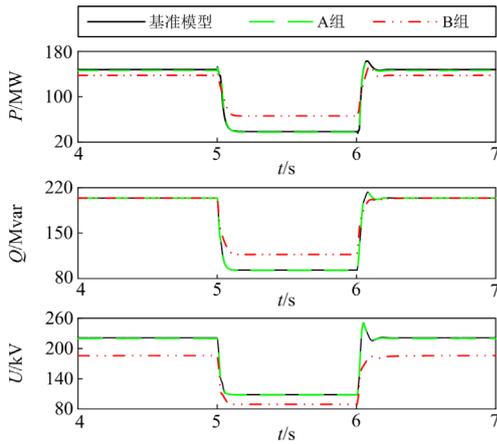


图7 三相电压跌落对比

Fig. 7 Comparison of three-phase voltage dip

等值误差对比如表9所示。由表9可知,无论是稳态工况还是电压跌落工况,推荐区间内参数(A组)对应的各电气量等值误差均较小。例如,在稳态运行点,A组参数有功功率等值误差为-0.8%,B组为-6.9%;在电压跌落期间,A组参数有功功率等值误差为-2.04%,B组为71.53%。测试结果与理论分析相一致。

表9 等值误差对比

Table 9 Comparisons of equivalent errors

		%		
工况		有功功率 等值误差	无功功率 等值误差	电压有效值 等值误差
A组	稳态	-0.80	-0.00	-0.50
	电压跌落	-2.04	-0.31	-0.36
B组	稳态	-6.90	-0.04	-15.94
	电压跌落	71.53	26.05	-17.55

4.3 宽频振荡

倍乘元件阻抗参数设置不当,不仅会导致等值精度变差,也会对系统稳定性产生影响。以含2台机组的风电场模型为基准,分别采用推荐区间内、外两组参数实现机组等值聚合,推荐区间内参数记为A组,推荐区间外参数记为B组。采用频域阻抗扫描方法,对比参数设置对宽频振荡的影响。

仿真参数设置如表10所示。

分别绘制A、B两组频率扫描的幅值、相位曲线,如图8、图9所示。图8、图9中的互联系统指并网网所连接的交流系统侧,基准模型指未采用聚合的详细风电场侧,A、B组分别指采用不同参数聚合的风电场侧。若互联系统侧与风电场侧幅值交点对应频率处的相位差小于 180° ,则系统没有振荡风险;交点相位差与 180° 之间的差值称为相位裕度,即系统从现状到失稳边界的裕度。

表10 仿真参数(3)

Table 10 Simulation parameters (3)

参数	数值
系统总容量/MVA	10.4
单机容量/MVA	5.2
仿真步长/ μ s	20
单机模型倍乘系数	2
频率扫描区间/Hz	0~1000
频率扫描间隔/Hz	20
R_p (A组)/ Ω	7000
C (A组)/ μ F	1
R_p (B组)/ Ω	1000
C (B组)/ μ F	20

由图8可知,在A组参数设置下,互联系统与基准模型、等值模型(A组)的阻抗扫描曲线幅值交点均为277 Hz,对应的相位差分别为 126.24° 、 126.17° ,均小于 180° ,系统没有失稳风险,且相位裕度基本一致。计算基准模型与等值模型(A组)相位的平均相对误差为1.41%。

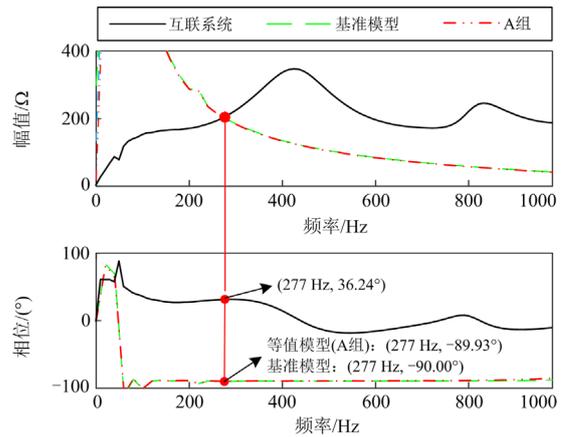


图8 频率扫描测试波形(1)

Fig. 8 Waveform of frequency sweep test (1)

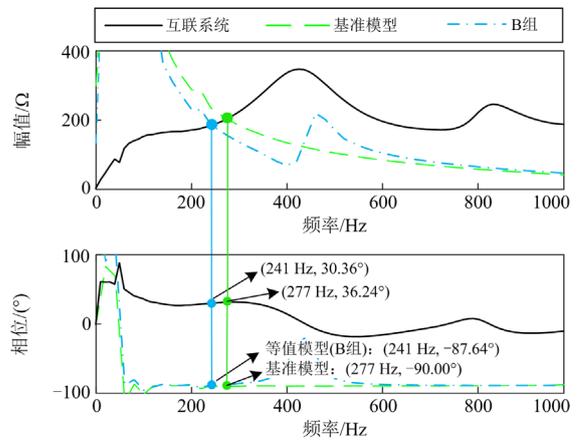


图9 频率扫描测试波形(2)

Fig. 9 Waveform of frequency sweep test (2)

由图 9 可知, 在 B 组参数下, 互联系统与基准模型、等值模型(B 组)的阻抗扫描曲线交点位置明显偏移, 分别为 277 Hz、241 Hz, 对应的相位差分别为 126.24°、118°, 均小于 180°, 尽管系统仍没有失稳风险, 但相位裕度由 53.76°变为 62°, 系统稳定性判断被乐观化。此时基准模型与等值模型(B 组)相位的平均相对误差为 20.81%。

综合图 8、图 9 可知, 倍乘元件参数设定不恰当, 不仅影响系统稳定裕度, 还会使频域阻抗扫描相位曲线的误差明显增大。

5 建模常用单机倍乘元件扩展

除上文的研究对象倍乘元件 A 外, 记风电场等值模型中另一种常用的风电机组单机倍乘元件为倍乘元件 B, 其自定义设置参数为阻抗标么值 X_t , 根据 PSCAD 软件中对该倍乘元件的帮助文档可知, 此值常设置为与倍乘元件联结的传输线阻抗标么值, 继而采用基准电压、功率来计算倍乘元件等效阻抗值: $Z'_C = X_t \cdot U_B^2 / S_B$ 。倍乘元件 B 的物理示意图如图 10 所示。

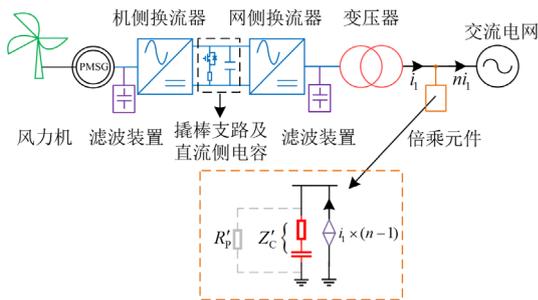


图 10 倍乘元件 B

Fig. 10 Multiplier element B

与倍乘元件 A 类似, 图 10 中: i_i 为单台机组出口电流; n 为倍乘系数。两种经典倍乘元件的原理相同, 参数设置也存在相似性与关联性。

倍乘元件 B 中的元件阻抗 Z'_C 即与倍乘元件 A 中的 R_C 、 C 串联共同作用量相当, 满足式(10)。

$$Z'_C = R'_C + 1/j\omega C' \quad (10)$$

参考帮助文档, 若考虑数值振荡抑制, 可以在现有元件基础上并联一个电阻, 此并联电阻与倍乘元件 A 中的 R_p 作用相当。

介于两种倍乘元件参数设置存在相似性与关联性, 针对倍乘元件 A 的研究测试结果, 同样适用于倍乘元件 B 的参数设置。

6 结论

本文从风电场站等值误差入手, 搭建多组模型展开参数遍历测试, 通过规律总结及理论分析, 研究单机聚合模型倍乘元件阻抗参数在风电场站等值建模中的影响, 得出以下结论:

- 1) 倍乘元件阻抗参数影响风电场站等值误差, 在给定误差的前提下, 聚合机组台数不同, 推荐参数范围不同;
- 2) 一般情况下, 调大参数 R_p 、调小参数 C , 可以有效降低等值误差(在 3%以内); 采取有功功率等值误差限定参数 R_p 、电压有效值等值误差限定参数 C 、无功功率等值误差、仿真步长上限检验的方式确定参数范围;
- 3) 倍乘元件阻抗参数推荐值不仅适用于降低稳态运行点误差, 也可以有效降低三相电压跌落、宽频振荡多种工况下的等值误差。

附录 A

表 A1 含 9 台机组的风电场模型等值误差(有功功率)

Table A1 Equivalent error of wind farm model with 9 wind turbines (active power)

C/μF	有功功率									
	$R_p = 50 \Omega$	$R_p = 100 \Omega$	$R_p = 200 \Omega$	$R_p = 500 \Omega$	$R_p = 1 \text{ k}\Omega$	$R_p = 2 \text{ k}\Omega$	$R_p = 5 \text{ k}\Omega$	$R_p = 10 \text{ k}\Omega$	$R_p = 20 \text{ k}\Omega$	$R_p = 50 \text{ k}\Omega$
0.1	-47.42%	-24.65%	-12.47%							
0.5	-47.41%	-24.65%	-12.47%	-4.94%						
1	-47.39%	-24.64%	-12.47%	-4.93%	-2.39%	-1.10%	-0.33%	-0.07%	0.06%	0.14%
2	-47.36%	-24.62%	-12.46%	-4.93%	-2.38%	-1.10%	-0.33%	-0.07%	0.06%	0.13%
3	-47.32%	-24.60%	-12.45%	-4.93%	-2.38%	-1.10%	-0.33%	-0.07%	0.06%	0.14%
4	-47.28%	-24.59%	-12.43%	-4.92%	-2.38%	-1.09%	-0.32%	-0.07%	0.06%	0.14%
5	-47.25%	-24.57%	-12.42%	-4.91%	-2.36%	-1.08%	-0.31%	-0.06%	0.07%	0.15%
10	-47.09%	-24.52%	-12.43%	-4.95%	-2.42%	-1.14%	-0.38%	-0.12%	0.01%	0.08%
30	-46.50%	-24.29%	-12.45%	-5.10%	-2.61%	-1.36%	-0.61%	-0.35%	-0.23%	-0.15%
50	-45.93%	-24.13%	-12.49%	-5.25%	-2.80%	-1.57%	-0.83%	-0.58%	-0.46%	-0.39%
100	-44.58%	-23.80%	-12.74%	-5.89%	-3.57%	-2.40%	-1.69%	-1.46%	-1.34%	-1.27%
200	-43.63%	-23.84%	-13.42%	-6.98%	-5.51%	-4.80%	-4.18%	-3.96%	-3.86%	-3.80%

表 A2 含 9 台机组的风电场模型等值误差(无功功率)

Table A2 Equivalent error of wind farm model with 9 wind turbines (reactive power)

C/ μ F	无功功率									
	$R_p = 50 \Omega$	$R_p = 100 \Omega$	$R_p = 200 \Omega$	$R_p = 500 \Omega$	$R_p = 1 \text{ k}\Omega$	$R_p = 2 \text{ k}\Omega$	$R_p = 5 \text{ k}\Omega$	$R_p = 10 \text{ k}\Omega$	$R_p = 20 \text{ k}\Omega$	$R_p = 50 \text{ k}\Omega$
0.1	-5.58%	-3.08%	-1.44%							
0.5	-5.54%	-3.05%	-1.40%	-0.40%						
1	-5.48%	-3.00%	-1.35%	-0.35%	-0.02%	0.15%	0.25%	0.28%	0.30%	0.31%
2	-5.38%	-2.90%	-1.26%	-0.26%	0.08%	0.24%	0.34%	0.38%	0.39%	0.40%
3	-5.27%	-2.81%	-1.17%	-0.17%	0.17%	0.34%	0.44%	0.47%	0.49%	0.50%
4	-5.17%	-2.72%	-1.07%	-0.07%	0.26%	0.43%	0.53%	0.56%	0.58%	0.59%
5	-5.06%	-2.62%	-0.98%	0.02%	0.36%	0.52%	0.62%	0.66%	0.68%	0.69%
10	-4.54%	-2.15%	-0.50%	0.49%	0.83%	1.00%	1.10%	1.13%	1.15%	1.16%
30	-2.56%	0.01%	1.29%	2.29%	2.63%	2.80%	2.90%	2.93%	2.95%	2.96%
50	-0.75%	1.88%	3.22%	3.92%	4.26%	4.42%	4.52%	4.56%	4.57%	4.58%
100	3.01%	5.75%	7.15%	8.00%	8.28%	8.43%	8.51%	8.54%	8.55%	8.56%
200	5.79%	8.71%	10.20%	11.10%	10.46%	13.02%	13.11%	13.14%	13.15%	19.74%

表 A3 含 9 台机组的风电场模型等值误差(电压有效值)

Table A3 Equivalent error of wind farm model with 9 wind turbines (RMS voltage)

C/ μ F	电压有效值									
	$R_p = 50 \Omega$	$R_p = 100 \Omega$	$R_p = 200 \Omega$	$R_p = 500 \Omega$	$R_p = 1 \text{ k}\Omega$	$R_p = 2 \text{ k}\Omega$	$R_p = 5 \text{ k}\Omega$	$R_p = 10 \text{ k}\Omega$	$R_p = 20 \text{ k}\Omega$	$R_p = 50 \text{ k}\Omega$
0.1	-4.15%	-1.93%	-1.03%							
0.5	-4.18%	-1.96%	-1.06%	-0.51%						
1	-4.21%	-1.99%	-1.09%	-0.54%	-0.36%	-0.26%	-0.21%	-0.19%	-0.18%	-0.17%
2	-4.28%	-2.05%	-1.15%	-0.60%	-0.42%	-0.33%	-0.27%	-0.25%	-0.24%	-0.24%
3	-4.35%	-2.11%	-1.22%	-0.67%	-0.48%	-0.39%	-0.34%	-0.32%	-0.31%	-0.30%
4	-4.43%	-2.18%	-1.28%	-0.73%	-0.55%	-0.45%	-0.40%	-0.38%	-0.37%	-0.37%
5	-4.50%	-2.24%	-1.34%	-0.79%	-0.61%	-0.52%	-0.46%	-0.44%	-0.43%	-0.43%
10	-4.85%	-2.56%	-1.67%	-1.13%	-0.95%	-0.86%	-0.80%	-0.78%	-0.78%	-0.77%
30	-6.27%	-4.12%	-2.98%	-2.46%	-2.29%	-2.20%	-2.14%	-2.13%	-2.12%	-2.11%
50	-7.69%	-5.61%	-4.53%	-3.78%	-3.61%	-3.52%	-3.47%	-3.45%	-3.45%	-3.44%
100	-11.25%	-9.34%	-8.35%	-7.74%	-7.54%	-7.44%	-7.38%	-7.36%	-7.35%	-7.34%
200	-14.84%	-13.34%	-12.58%	-12.11%	-13.69%	-15.15%	-15.10%	-15.08%	-15.07%	-15.07%

表 A4 含 30 台机组的风电场模型等值误差(有功功率)

Table A4 Equivalent error of wind farm model with 30 wind turbines (active power)

C/ μ F	有功功率									
	$R_p = 50 \Omega$	$R_p = 100 \Omega$	$R_p = 200 \Omega$	$R_p = 500 \Omega$	$R_p = 1 \text{ k}\Omega$	$R_p = 2 \text{ k}\Omega$	$R_p = 5 \text{ k}\Omega$	$R_p = 10 \text{ k}\Omega$	$R_p = 20 \text{ k}\Omega$	$R_p = 50 \text{ k}\Omega$
0.1										
0.5										
1	-14.79%									
2	-14.77%									
3	-14.76%	-7.55%								
4	-14.75%	-7.55%	-3.83%	-1.56%	-0.79%	-0.41%	-0.19%	-0.11%	-0.07%	-0.05%
5	-14.74%	-7.54%	-3.83%	-1.56%	-0.80%	-0.42%	-0.19%	-0.11%	-0.07%	-0.05%
10	-14.47%	-7.52%	-3.83%	-1.58%	-0.82%	-0.44%	-0.21%	-0.13%	-0.10%	-0.07%
30	-13.79%	-7.36%	-3.83%	-1.64%	-0.90%	-0.52%	-0.30%	-0.23%	-0.19%	-0.17%
50	-13.13%	-7.14%	-3.87%	-1.80%	-1.10%	-0.74%	-0.53%	-0.45%	-0.42%	-0.39%
70	-12.54%	-6.99%	-3.97%	-2.07%	-1.42%	-1.10%	-0.90%	-0.83%	-0.80%	-0.78%
200	-59.60%	-58.07%	-57.28%	-56.82%	-56.67%	-56.60%	-56.55%	-56.53%	-56.52%	-56.52%

表 A5 含 30 台机组的风电场模型等值误差(无功功率)

Table A5 Equivalent error of wind farm model with 30 wind turbines (reactive power)

C/ μ F	无功功率									
	$R_p = 50 \Omega$	$R_p = 100 \Omega$	$R_p = 200 \Omega$	$R_p = 500 \Omega$	$R_p = 1 \text{ k}\Omega$	$R_p = 2 \text{ k}\Omega$	$R_p = 5 \text{ k}\Omega$	$R_p = 10 \text{ k}\Omega$	$R_p = 20 \text{ k}\Omega$	$R_p = 50 \text{ k}\Omega$
0.1										
0.5										
1	-3.32%									
2	-3.28%									
3	-3.24%	-1.56%								
4	-3.21%	-1.53%	-0.70%	-0.20%	-0.03%	0.05%	0.10%	0.12%	0.13%	0.13%
5	-3.17%	-1.50%	-0.67%	-0.17%	-0.00%	0.08%	0.13%	0.15%	0.16%	0.16%
10	-2.49%	-1.34%	-0.51%	-0.02%	0.14%	0.23%	0.27%	0.29%	0.30%	0.30%
30	-1.12%	-0.32%	0.02%	0.50%	0.65%	0.73%	0.78%	0.80%	0.80%	0.81%
50	-0.56%	0.57%	1.12%	1.42%	1.52%	1.57%	1.60%	1.61%	1.62%	1.62%
70	-0.97%	0.44%	1.13%	1.54%	1.68%	1.74%	1.78%	1.80%	1.80%	1.81%
200	-42.32%	-42.53%	-42.64%	-42.72%	-42.74%	-42.76%	-42.76%	-42.76%	-42.77%	-42.77%

表 A6 含 30 台机组的风电场模型等值误差(电压有效值)

Table A6 Equivalent error of wind farm model with 30 wind turbines (RMS voltage)

C/ μ F	电压有效值									
	$R_p = 50 \Omega$	$R_p = 100 \Omega$	$R_p = 200 \Omega$	$R_p = 500 \Omega$	$R_p = 1 \text{ k}\Omega$	$R_p = 2 \text{ k}\Omega$	$R_p = 5 \text{ k}\Omega$	$R_p = 10 \text{ k}\Omega$	$R_p = 20 \text{ k}\Omega$	$R_p = 50 \text{ k}\Omega$
0.1										
0.5										
1	-2.12%									
2	-2.19%									
3	-2.26%	-1.26%								
4	-2.32%	-1.32%	-0.83%	-0.53%	-0.23%	-0.38%	-0.35%	-0.34%	-0.33%	-0.33%
5	-2.39%	-1.39%	-0.90%	-0.60%	-0.50%	-0.45%	-0.42%	-0.41%	-0.40%	-0.40%
10	-3.76%	-1.73%	-1.24%	-0.95%	-0.85%	-0.80%	-0.77%	-0.76%	-0.76%	-0.75%
30	-7.67%	-4.39%	-2.61%	-2.33%	-2.24%	-2.19%	-2.16%	-2.15%	-2.15%	-2.15%
50	-11.85%	-8.77%	-7.14%	-6.12%	-5.78%	-5.61%	-5.51%	-5.47%	-5.46%	-5.44%
70	-16.33%	-13.49%	-11.98%	-11.04%	-10.73%	-10.57%	-10.47%	-10.44%	-10.42%	-10.41%
200	-61.73%	-61.76%	-61.77%	-61.78%	-61.79%	-61.79%	-61.79%	-61.79%	-61.79%	-61.79%

参考文献

- [1] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [2] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint
- planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [3] 周原冰, 杨方, 余潇潇, 等. 中国能源电力碳中和实现路径及实施关键问题[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 1-11.
ZHOU Yuanbing, YANG Fang, YU Xiaoxiao, et al. Realization pathways and key problems of carbon neutrality in China's energy and power system[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 1-11.
- [4] 魏泓屹, 卓振宇, 张宁, 等. 中国电力系统碳达峰·碳中和转型路径优化与影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 1-12.

- WEI Hongyi, ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, et al. Transition path optimization and influencing factor analysis of carbon emission peak and carbon neutrality for power system of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 1-12.
- [5] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
- GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [6] 董雪涛, 冯长有, 朱子民, 等. 新型电力系统仿真工具研究初探[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 53-63.
- DONG Xuetao, FENG Changyou, ZHU Zimin, et al. Preliminary study on simulation tool for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 53-63.
- [7] 吕昊, 何益鸣, 田浩, 等. 基于物联网的园区综合能源系统快速通信网络建模与仿真[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 166-173.
- LÜ Hao, HE Yiming, TIAN Hao, et al. Modeling and simulation of fast communication network for park integrated energy system based on IoT[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 166-173.
- [8] 钟苏帆. 协同新能源发展的电网规划关键技术探讨[J]. 电子世界, 2019(24): 74-75.
- ZHONG Sufan. Discussion on key technologies of power grid planning in collaboration with new energy development[J]. Electronics World, 2019(24): 74-75.
- [9] 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 insub-synchronous oscillations analysis of gird-connected wind power systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 33-43.
- [10] 李钢, 田杰, 王仙荣, 等. 远海风电送出技术应用现状及发展趋势[J]. 供用电, 2022, 39(11): 2-10.
- LI Gang, TIAN Jie, WANG Xianrong, et al. Application status and development trend of offshore wind power transmission technology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 2-10.
- [11] 杨光绕, 郝正航, 陈卓, 等. 基于FPGA-CPU的双馈风电系统异步协同仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 72-81.
- YANG Guangrao, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Asynchronous co-simulation of a double-fed wind power system based on FPGA-CPU[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 72-81.
- [12] 段炼. 基于运行模式的风电电力系统概率潮流分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] JIN Y, WU D, JU P, et al. Modeling of wind speeds inside a wind farm with application to wind farm aggregate modeling considering LVRT characteristic[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 508-519.
- [14] 张思彤, 梁纪峰, 马燕峰, 等. 直驱风电场经柔性直流输电电网的宽频振荡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 33-42.
- ZHANG Sitong, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Broadband oscillation characteristics analysis of a VSC-HVDC connected direct drive wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 33-42.
- [15] 朱乾龙, 齐盟. 风电场等值模型准确度评价研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 180-184.
- ZHU Qianlong, QI Meng. Review on accuracy evaluation of equivalent model of wind farm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 180-184.
- [16] 李龙源, 付瑞清, 吕晓琴, 等. 接入弱电网的同型机直驱风电场单机等值建模[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 712-725.
- LI Longyuan, FU Ruiqing, LÜ Xiaoqin, et al. Single machine equivalent modeling of weak grid connected wind farm with same type PMSGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 712-725.
- [17] 古庭贇, 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.
- [18] 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 Xiaodong, 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.
- [19] TENG W, WANG X, MENG Y, et al. An improved support vector clustering approach to dynamic aggregation of large wind farms[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 215-223.
- [20] 颜湘武, 李君岩. 基于主成分分析法的直驱式风电场

- 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.
- [21] 苏晨博, 刘崇茹, 李志显, 等. 基于阻抗法的大规模风电场等值方法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 90-97.
SU Chenbo, LIU Chongru, LI Zhixian, et al. Research on equivalent method of large-scale wind farm based on impedance method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 90-97.
- [22] 康佳乐, 余浩, 段瑶, 等. 风电场次同步振荡等值建模方法研究[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 880-891.
KANG Jiale, YU Hao, DUAN Yao, et al. Equivalent modeling method of sub-synchronous oscillation in wind farm[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 880-891.
- [23] 马喜平, 何世恩, 姚寅, 等. 计及风速不确定性及相关性的风电场分区虚拟惯量估计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 123-131.
MA Xiping, HE Shien, YAO Yin, et al. Virtual inertia estimation of wind farm zones with wind speed uncertainty and correlation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 123-131.
- [24] AKHMATOV V. Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power[J]. 2003.
- [25] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋. 基于相似变换理论的直驱风电场经柔直并网系统次同步振荡简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4780-4791.
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, GAO Benfeng. Simplified model for studying the sub-synchronous oscillation of direct-drive wind farms via VSC-HVDC system based on similar transformation theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4780-4791.
- [26] 戚陈陈, 陈鹏伟, 陈新, 等. 分散式风电高渗透率接入直流受端电网频率特性建模与分析[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2161-2170.
QI Chenchen, CHEN Pengwei, CHEN Xin, et al. Modeling and analyzing for frequency characteristics of distributed wind power with high proportional participation in DC receiving power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2161-2170.
- [27] 王丹. 双馈风电场接入含固定串补系统次同步振荡分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [28] 周佩朋, 孙华东, 项祖涛, 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(三): 电磁暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2990-3000.
ZHOU Peipeng, SUN Huadong, XIANG Zutao, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy stations for large-scale power system simulation (3) electromagnetic transient models[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2990-3000.
- [29] 夏玥. 永磁直驱风电场聚合模型研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [30] 尤超, 刘国玉, 徐明宇, 等. 风电场聚合等值误差机理探究[J]. 黑龙江电力, 2022, 44(3): 198-204.
YOU Chao, LIU Guoyu, XU Mingyu, et al. Study on mechanism of equivalent errors in wind farm aggregation[J]. Heilongjiang Electric Power, 2022, 44(3): 198-204.
- [31] 张瑛, 王胜辉, 袁宏. 电力系统仿真计算中的数值振荡问题[J]. 东北电力技术, 1999(4): 12-14.
ZHANG Ying, WANG Shenghui, YUAN Hong. Numerical oscillation problem in power system simulation[J]. Northeast Electric Power Technology, 1999(4): 12-14.
- [32] 杨明, 张永明, 张子骞, 等. 电力系统电磁暂态仿真算法研究综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(8): 10-19.
YANG Ming, ZHANG Yongming, ZHANG Ziqian, et al. Review on electromagnetic transient simulation algorithm of power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 10-19.
- [33] 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, 2018.
- [34] NGUYEN H V, DOMMEL H W, MARTI J R. Modeling of single-phase nonuniform transmission lines in electromagnetic transient simulations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 916-926.

收稿日期: 2023-05-13; 修回日期: 2023-08-24

作者简介:

王晗玥(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统建模仿真分析;

许建中(1987—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为柔性直流输电和新能源并网技术。

(编辑 姜新丽)