## 适用于次同步振荡分析的直驱式风电场等值方法

袁赛军<sup>1,2</sup>,郝治国<sup>2</sup>,舒进<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司电力调度控制中心,湖南 长沙 410004;

2. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;3. 西安热工院有限公司,陕西 西安 710054)

**摘要:**为解决大规模直驱式风电场阻抗建模困难和数值仿真节点限制的问题,基于阻抗分析法的核心原理, 以等值前、后直驱式风电场外阻抗特性相一致为目标,提出了适用于次同步振荡分析的直驱式风电场等值方 法。该方法包括基于阻抗灵敏度分析的分群聚合和基于遗传算法的等值降阶2个步骤。分别以风电场含相 同型号直驱风机和不同型号直驱风机为例,对等值前、后的直驱式风电场外阻抗特性进行对比分析。结果表 明,所提方法能够实现大规模直驱式风电场模型的等值降阶,等值前、后的直驱式风电场外阻抗特性较为接 近,其等值误差能够被量化。

关键词:风电场等值;次同步振荡;阻抗分析法;直驱风机;灵敏度分析;遗传算法
 中图分类号:TM 614
 文献标志码:A
 DOI:

DOI:10.16081/j.epae.202204029

#### 0 引言

随着大规模、高比例、远距离输送的直驱风机 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)并 网,现代电力系统在运行中出现了新型次同步振荡 SSO(Sub-Synchronous Oscillation)现象。区别于传 统的火电机组和双馈式风电机组,2015年7月1日 在我国新疆哈密地区发生的大规模直驱风机次同步 振荡事故与机组轴系和输电线路串联补偿均无关, 且振荡电流以超同步频率分量为主,因而适用于传 统火电机组和双馈式风电机组的次同步振荡相关机 理及抑制措施难以指导直驱风机的并网运行<sup>[1-2]</sup>。

阻抗分析法作为近年来兴起的、为国内外学者 重点关注的次同步振荡分析方法,被广泛应用于分 析直驱风机与弱交流电网之间的相互作用问题<sup>[3-6]</sup>。 阻抗分析法的核心原理在于:基于谐波线性化理论, 分别建立直驱风机侧和电网侧的小信号线性化阻抗 解析模型,然后利用奈奎斯特判据对系统稳定性进 行判定<sup>[7-8]</sup>。目前基于阻抗分析法的直驱风机并网 次同步振荡相关研究取得了较为一致的结论:从风 机侧来看,直驱风机锁相环PLL(Phase-Locked Loop) 参数的选取是引发系统次同步振荡的主要影响因 素<sup>[3-5]</sup>;从电网侧来看,当电网阻抗增大、电网短路比 SCR(Short Circuit Ratio)减小时,直驱风机接入弱 交流电网易引发系统次同步振荡,称这一场景为直 驱风机并网引发次同步振荡的典型场景。

然而,现阶段研究对象普遍为单台直驱风机,对

收稿日期:2021-05-27;修回日期:2021-11-16 在线出版日期:2022-04-08

基金项目:中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ18-H34)

Project supported by the Headquarters Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ18-H34) 于整座直驱式风电场和电网的相互作用机理仍然缺 乏完整严密的数学分析,其原因在于大型风电场阻 抗建模和仿真分析均面临"维数灾"的问题。研究适 用于次同步振荡分析的风电场等值方法是实现由单 机并网分析到风电场并网分析的必经之路,其包含 降阶、适用2个基本要求。由阻抗分析法的核心原 理可知,适用于次同步振荡分析的风电场等值方法 评价标准在于降阶模型对原风电场外阻抗特性的逼 近程度。同时,为了仿真分析的需要,降阶后的模型 最好具有结构保持特征,能够降阶为几台风机的数 学模型,而非单台风机的数学表达式。

现有分析风电场与交流电网之间的相互作用的 研究思路大致分为如下3种:①建立详细模型,即对 每台风机进行单独建模,相关学者在应用阻抗分析 法研究直驱式风电场并网次/超同步振荡相互作用 机理时,提出了风电场阻抗聚合方法<sup>[9-10]</sup>,但是聚合 阻抗模型阶数随风机台数成比例增加,甚至超过仿 真平台节点数限制;②从风机数学模型出发,获得单 机降阶模型<sup>[11-14]</sup>,但其缺点在于所得降阶数学模型 不再具有风机的结构保持特征;③获得风电场的等 值模型,即用1台或多台等值机来模拟整座风电 场<sup>[15-17]</sup>,然而现有等值方案仅从保持风电场电磁暂 态特征出发,以风速等指标为分群特征,未拟合风电 场外阻抗特性,因而无法适用于风机并网后的次同 步振荡分析。

因此,以等值前、后风电场外阻抗特性相一致为 目标,本文提出了一种直驱式风电场等值方案,将直 驱式风电场等值降阶为具有结构保持特征的等值 机,在分群聚合和等值降阶2个步骤中量化了误差。 分别以直驱式风电场含同型号直驱风机和不同型号 直驱风机为例,对所提方案所得等值机(群)的阻抗 特性仿真结果和原始风电场外阻抗特性扫频结果进 行对比。结果表明所提方案等值模型与直驱式风电 场原始阻抗模型具有较为接近的外阻抗特性,适用 于直驱式风电场并网后的次同步振荡分析。

#### 1 直驱式风电场拓扑及其阻抗模型

图1为直驱式风电场并网系统的典型布局。每 台直驱风机及变流器经箱式变压器(以下简称"箱 变")升压至35kV后汇集至1条集电线路处,各条集 电线路由中压母线汇集送出,将风电经直驱式风电 场主变输送至电压等级为110kV或220kV的高压 电网中。





在分析直驱式风电场并网次同步振荡时,往往 将每台直驱风机及变流器简化为图1虚线框内的电 流源型逆变器经滤波电感并网的形式(GSI为网侧 逆变器;PCC为风机并网点;V<sub>dc</sub>为逆变器直流母线电 压)。定义单台直驱风机序阻抗为从箱变低压侧看 进去的端口阻抗,其锁相环传递函数*T<sub>p</sub>(s)*及正序端 口阻抗*Z(s)*表达式分别为<sup>[4]</sup>:

$$T_{\rm p}(s) = \frac{1}{2} \frac{H_{\rm pll}(s - j\omega_{\rm 1})}{1 + VH_{\rm pll}(s - j\omega_{\rm 1})}$$
(1)

$$Z(s) = \frac{-(s - j\omega_1)L - H_i(s - j\omega_1)}{H_i(s - j\omega_1)IT_p(s)e^{j\varphi_n} + VT_p(s) - 1}$$
(2)

式中: $\omega_1=2\pi f_1$ 为工频角频率,  $f_1$ 为工频; $H_{pll}(s)=(k_p+k_i/s)/s, k_p, k_i$ 分别为锁相环比例积分 PI(Proportional Integral)调节器比例、积分参数;V为直驱风机机端 正序电压幅值;L为变流器出口等效滤波电感; $H_i(s)=k_{ip}+k_{il}/s, k_{ip}, k_{ii}$ 分别为电流内环 PI调节器比 例、积分参数;I为直驱风机的输出电流; $\varphi_{i1}$ 为直驱风 机输出电流的功率因数角。

从图1中可以看出,由于大型直驱式风电场中 集电线路的长度、参数各异,在进行直驱式风电场等 值时,主要处理的是直驱风机阻抗与集电线路阻抗 的串、并联关系。为探究集电线路阻抗对直驱风机 机端电压的影响,根据附录A表A1所示的某实际 直驱式风电场参数,选取一条汇集10台直驱风机、 长度为6.2 km的集电线路,以100 MW 为基准,计算 出工频下折算到35 kV侧的参数如下:集电线路阻抗 Z<sub>35</sub>=0.073 4+j0.051 8 p.u.;箱变阻抗Z<sub>T</sub>=j0.325 p.u.; 额定工况下直驱风机阻抗Z<sub>PMSG</sub>=-6.67 p.u.。

即使在集电线路汇集直驱风机台数多、直驱风 机满发以及集电线路很长这3种情况同时出现的工 况下,直驱风机阻抗也远大于集电线路及箱变阻抗 之和。因此,对于实际的直驱式风电场,可假设每台 直驱风机机端电压等于直驱式风电场主变低压侧电 压,即所有直驱风机之间为纯并联关系,可不计其间 复杂的拓扑结构。在该条件下直驱式风电场的聚合 阻抗 Z<sub>x</sub>(s)的表达式为:

$$Z_{\Sigma}(s) = 1 / \left( \sum_{k'=1}^{n'} 1 / Z_{k'}(s) \right)$$
(3)

式中: $Z_{k'}(s)$ 为第k'台直驱风机的正序端口阻抗;n'为直驱风机总数。

#### 2 基于阻抗灵敏度分析的分群聚合

#### 2.1 阻抗灵敏度分析

分群聚合是直驱式风电场等值的第一步,首先 应该衡量不同直驱风机参数对并联阻抗模型阶数的 影响,其次应该按照影响程度对不同直驱风机参数 进行排序。考虑到式(2)所示的幅频特性和相频特 性完全对称于50 Hz,令s'=s-jω<sub>1</sub>,进行位移变换后展 开,忽略s'上标可得:

$$Z(s) = \frac{-sL - H_i(s)}{H_i(s)IT_p(s+j\omega_1) + VT_p(s+j\omega_1) - 1} = [-Ls^4 - (k_{ip} + k_pLV)s^3 - (k_iLV + k_{ii} + k_pk_{ip}V)s^2 - (k_pk_{ii}V + k_{ip}k_iV)s - k_{ii}k_iV] / [-s^3 + 0.5(k_{ip}I - k_pV)s^2 + 0.5(k_pk_{ii}I + k_ik_{ip}I - k_iV)s + 0.5k_ik_{ii}I]$$
(4)

从式(4)可以看出,直驱风机输出电流I只出现 在分母,风速与I存在相关关系,因此在计算直驱式 风电场并联阻抗时,单纯因风速的差异不会增加直 驱式风电场聚合阻抗的阶数。因此,与输出电流相 关的风速不应该成为直驱风机分群指标;而锁相环 参数 $k_p,k_i$ 和电流内环参数 $k_{ip},k_a$ 以及等效滤波电感L将成为直驱风机分群指标,进而影响直驱式风电场 聚合阻抗的复杂度。故针对上述5个参数进行阻抗 灵敏度分析,以确定直驱风机分群指标。直驱风机 正序端口阻抗Z相对于参数 $x(k_p,k_i,k_{ip},k_a,L)$ 的归一 化灵敏度 $S_x^2$ 表达式见式(5)。

$$S_x^Z = \frac{\partial Z/Z}{\partial x/x} \tag{5}$$

设 V=636 V; I=1847 A; 电流内环控制参数  $k_{ip}$ = 0.25,  $k_{ii}$ =355; 锁相环控制参数  $k_p$ =0.085,  $k_i$ =32; L= 0.15 mH。将上述参数代入式(5),即可计算  $S_x^Z$ 。根 据文献[4]得出的直驱风机-弱交流电网不稳定频率 区间及位移变换,作出图 2 所示[20,30] Hz 区间内 的归一化灵敏度幅频特性及相频特性曲线,该曲线 的变化情况可表征参数对直驱式风电场外阻抗特性 的影响。由图可知:锁相环参数k<sub>i</sub>、k<sub>p</sub>对直驱式风电 场的外阻抗特性影响较为显著;而电流内环参数k<sub>i</sub>、 k<sub>ip</sub>对直驱式风电场的外阻抗特性的影响较小;L对直 驱式风电场的外阻抗特性的影响在此频段内可忽略 不计。且经进一步推导,受锁相环参数k<sub>i</sub>影响的直 驱式风电场的外阻抗特性与受k<sub>p</sub>影响的直驱式风电 场的外阻抗特性的相位差始终为-90°。





Fig.2 Characteristics of amplitude-frequency and phase-frequency of normalized sensitivity

#### 2.2 直驱风机分群聚合

从阻抗灵敏度分析结果来看,锁相环参数对直 驱式风电场阻抗外特性的影响较为显著,故将其作 为分群指标。为清晰起见,以2.1节参数下直驱风机 正序端口阻抗Z为对照,将其锁相环比例、积分参数 等比例放大后的直驱风机阻抗Z<sup>1</sup>如图3所示,阻抗 幅值的相对变化量为:

$$\left|\Delta Z/Z\right| = \sqrt{\left(S_{k_{\rm s}}^Z \Delta k_{\rm i}/k_{\rm i}\right)^2 + \left(S_{k_{\rm s}}^Z \Delta k_{\rm p}/k_{\rm p}\right)^2} \tag{6}$$

式中: $\Delta Z$ 为直驱风机锁相环变化带来的阻抗变化 量; $\Delta k_i, \Delta k_p$ 分别为 $k_i, k_p$ 的变化量。据2.1节分析,由 于 $S^z_{k_i} 和 S^z_{k_p}$ 相频特性始终相差-90°,无论 $\Delta k_i, \Delta k_p$ 如 何变化,在[20,30] Hz区间内, $\Delta Z/Z$ 总会落在式(6) 所示阻抗圆内。综上所述,选取 $|\Delta Z/Z|$ 作为直驱风 机的分群指标。



图 3 不同锁相环参数下直驱风机阻抗对比

# Fig.3 Impedance comparison of PMSG under different PLL parameters

若直驱式风电场控制中心能够获取所有直驱风 机的控制参数,则可选取各台直驱风机锁相环参数 作为分群指标,对各台直驱风机进行机群划分。显 然,为获得较好的等值效果,需使同一机群的锁相环 参数呈现明显的中心聚集特征,并建议单个机群中 的|ΔZ/Z|不大于5%,这是因为较小的阈值可进一步 提高等值精度。

本文选用*K*-means算法实现直驱式风电场分群 的过程<sup>[18]</sup>。基于阻抗灵敏度的分析结果,直驱风机 分群聚合流程如图4所示。



图4 直驱风机分群聚合流程



经过分群后,可以认为同一机群中任意2台直 驱风机由于控制参数差异带来的外阻抗幅值相对误 差不会超过5%。值得注意的是,在实际直驱式风电 场中不同直驱风机之间较少存在参数*I、k<sub>p</sub>、k<sub>i</sub>、k<sub>i</sub>、k<sub>i</sub>、k<sub>i</sub>、 L完全不同的现象。例如:由于直驱风机变流器批 量出厂,同型号的直驱风机<i>L*相等;同一批入网直驱 风机的并网控制器均采用同一套参数。故式(4)中 除了*I*外,其余参数均相等。按机型和入网批次分 群可作为实际工程中的直驱风机分群策略。

对于同一机群中的所有直驱风机,易得到其聚 合阻抗Zg(s)为:

$$Z_{\Sigma}^{q}(s) = \frac{-sL - H_{i}(s)}{H_{i}(s)T_{p}(s + j\omega_{1})\sum_{k=1}^{N_{q}}I_{k} + N_{q}VT_{p}(s + j\omega_{1}) - N_{q}}$$
(7)

式中:*N<sub>q</sub>*为机群*q*的直驱风机数量;*I<sub>k</sub>*为机群*q*中第*k* 台直驱风机的输出电流。从式(7)可以看出,同一机 群中的直驱风机在锁相环参数和等效滤波电感参数 相等的前提下,*N<sub>q</sub>*并不会影响聚合阻抗表达式的阶 数。这说明同一机群中的*N<sub>q</sub>*台风机完全可以用1台 直驱风机等效替代,选取合适的参数即可保持等值 后的阻抗特性不变。

### 3 基于遗传算法的直驱式风电场等值降阶 方法

数学意义上,大规模直驱式风电场等值过程可

转化为对高阶传递函数模型的降阶过程,为满足仿 真需要,降阶后的传递函数模型必须为具有式(2)所 示结构特征的1个或多个阻抗并联的模型。常用的 模型降阶方法(如平衡截断、Pade近似等)应用于本 文模型时,将出现系数耦合、超定方程求解等问题。

经过上述方法,风电场内的直驱风机可在满足 一定误差的条件下分为数群,由式(7)可得同一机群 的聚合阻抗。但其格式显然不同于式(2),无法直接 得出该机群的等值参数,不具有结构保持特征,需要 进一步研究如何将式(7)转换为式(2)所示的参数等 值方法。此外,超大规模直驱式风电场中若直驱风 机为多批次投产,且厂家类型较多,则其内部直驱风 机控制参数差异大,分群聚合后的机群数量可能较 多,依然会面临模型阶数较高的问题。

为此,本文提出了一种基于遗传算法的直驱式 风电场等值降阶方法,通过建立参数优化模型来获 得等值参数。下面对所提方法进行详细说明。

记分群聚合后直驱式风电场的阻抗模型为  $Z_0(s)$ ,其可表示为若干式(7)所示聚合阻抗并联的 传递函数。设等值后直驱式风电场内共n台等值 机,待优化参数为 $x_1$ 、…、 $x_k$ 、…、 $x_n$ ,第k台等值机待优 化参数为 $x_k = \{I_k, k_{p,k}, k_{ip,k}, k_{ip,k}, L_k\}$ 。将参数代入式 (4),设第k台等值机的阻抗为 $Z(s, x_k)$ ,则n台等值 机的总阻抗 $Z_{en}(s)$ 为:

$$Z_{\rm eq}(s) = 1/\left(\sum_{k=1}^{n} 1/Z(s, x_k)\right)$$
(8)

在很大程度上,遗传算法优化效果取决于适应 度函数的选取。为保证等值模型和Z<sub>0</sub>(s)在次同步 振荡分析频段具有足够接近的阻抗特性,应该在[0, 50] Hz 全频段考察Z<sub>eq</sub>(s)和Z<sub>0</sub>(s)阻抗特性的差异 性。需特别关注的不稳定频段为[20,30] Hz,以不同 频段设置不同采样点的方式进行采样,即[0,20) Hz 取10个采样点,[20,30] Hz取30个采样点,(30,50] Hz 取10个采样点。基于此,可以实现在[0,50] Hz频 段内对Z<sub>0</sub>(s)有较好的逼近效果。此外,采用遗传算 法时还应考虑如下因素:工频输出功率的等值,即等 值机的总输出电流应等于直驱式风电场总输出电 流;控制参数和等值滤波电感均为正数。综上所述, 基于遗传算法的参数优化模型如式(9)所示。

$$\left| \min f(x) = \frac{1}{50} \times \sum_{j=1}^{50} \left| \frac{Z_0(s_j) - Z_{eq}(s_j)}{Z_0(s_j)} \right| \times 100 \%$$

$$s.t. \quad \sum_{k=1}^n I_k = I_{sum}$$

$$k_{p_k} > 0, k_{i_k} > 0, k_{i_{p_k}} > 0, k_{i_{b_k}} > 0, L_k > 0$$

$$(9)$$

式中: f(x)为参数优化函数; s<sub>j</sub>为第 j 个离散采样频 点; I<sub>sum</sub>为直驱式风电场总输出电流。

针对直驱风机型号未知或控制参数无法获取的

直驱式风电场,通过外加谐波信号扫频的方法实现 直驱式风电场外阻抗特性的模拟。尽管此时所得直 驱式风电场外阻抗特性是非连续的散点,但是通过 本文方法同样可以得到式(9)所示适应度函数,进而 实现等值降阶。设置淘汰方式、遗传规则、变异概率 等参数后,基于遗传算法选出直驱风机的最优运行 参数,并给出等值模型的平均相对误差。

#### 4 算例分析与仿真验证

由于电磁暂态仿真步长为微秒级,本文分别以 含5台相同型号直驱风机和5台不同型号直驱风机 的直驱式风电场为例,基于PSCAD/EMTDC平台建 立仿真模型,运用所提等值方案对该小型直驱式风 电场进行等值,并通过扫频模拟直驱式风电场的外 阻抗特性,将等值结果与扫频结果进行对比分析,验 证等值方案的有效性。

#### 4.1 直驱风机型号相同

假设直驱式风电场内5台直驱风机型号相同 (即除了输出电流外,控制参数和滤波电感参数均 相等),5台直驱风机的输出电流分别为1800、900、 1500、1200、750 A,其余参数见附录A表A1。在模 型中省略箱变,5台直驱风机并联在幅值为565 V的 工频无穷大电源上。

根据式(7),5台相同型号的直驱风机可以用单台直驱风机等值,为验证这一推论,将上述参数代入式(9),通过遗传算法优化等值机参数。适应度函数随遗传代数的收敛过程如附录A图A1所示。由图可知,当种群规模为60、迭代次数约为150时,单台等值机和5台相同型号直驱风机的阻抗特性差异在幅值方面很快收敛至1%,这表明对于含有相同型号直驱风机的直驱式风电场,完全可以用1台等值机等效替代。本算例中得出的等值机参数为: *I*=6150A, *k*<sub>p</sub>=0.08672, *k*<sub>i</sub>=32, *k*<sub>ip</sub>=0.04, *k*<sub>i</sub>=82.35, *L*=0.1465 mH。该算例中等值误差仅为0.6846%。

按照上述参数,在PSCAD/EMTDC仿真平台分 別建立单台等值机和5台相同型号直驱风机的直驱 式风电场的电磁暂态模型,并分别进行仿真扫频。 考虑到适应度函数以控制阻抗特性差异的幅值为目 标,故此处在[50,100]Hz范围内将等值机与等值前 直驱式风电场阻抗模型的相频特性进行对比,如图 5所示。图中,Z<sub>total</sub>为5台直驱风机并联外阻抗,Z<sub>equ</sub> 为等值机阻抗。由图可知,相同型号1—5号直驱风 机尽管输出电流不同(模拟风速不同的实际场景), 但其相频特性依旧十分接近。Z<sub>total</sub>与Z<sub>equ</sub>的相频特 性曲线几乎重叠,验证了相同型号的风机可以用单 台风机等值的推论,证明了以风速为分群指标、电磁 暂态特征保持为目标的传统等值方法并不适用于直 驱式风电场并网后的次同步振荡分析。



图 5 相同型号风机等值前、后的相频特性对比



#### 4.2 直驱风机型号不同

假设直驱式风电场内有5种不同控制参数的直 驱风机。由前文分析可知,相同型号机群可以用1 台等值机替代,故本节中电磁暂态仿真下5台等值 机参数设置如附录A表A2所示。为了避免出现"维 数灾"的问题,进一步降低等值机台数,将表A2中参 数代入式(9),用遗传算法分别优化等值为1、2、3台 等值机的参数,所得降阶后的等值风机优化参数 如附录A表A3所示。由表A3可知,当等值机台数 分别为1、2、3时,与原始阻抗模型的幅频特性相 比,二者的平均误差百分比分别为10.8%、5.07%、 1.89%。

为了验证上述优化参数的实际等值效果,根据 附录A表A2、A3,基于PSCAD/EMTDC仿真平台分 别建立5台型号不同风机组成的风电场以及等值机 台数为1、等值机台数为2、等值机台数为3的风电场 阻抗电磁暂态仿真模型,扫频得到其相频特性,对比 结果如图6所示,图中Z<sub>5tel</sub>、Z<sub>5te2</sub>、Z<sub>5te3</sub>分别为等值机台 数为1—3的等值阻抗。由图可知,不同型号的直驱 风机阻抗相频特性差异化明显,其等值降阶具有极 大困难。当等值机台数为1时,其相频特性曲线与 Z<sub>tetal</sub>相比具有明显差异,此时无法实现精确模拟。 当等值机台数为2时,其相频特性曲线能较好地逼





Fig.6 Comparison of phase-frequency characteristics for equivalent model before and after equivalence of different types of PMSGs

近 Z<sub>total</sub> 的相频特性曲线,且进一步提高等值机台数 可以得到更好地实现所提方法的等值效果。

#### 5 结论

本文基于阻抗法的核心思想,研究了适用于次 同步振荡分析研究的直驱式风电场等值方案。首先 分析了现有方法的主要弊端,确定等值模型的基本 要求。然后提出了基于阻抗灵敏度分析的分群聚合 方法,确定了锁相环PI参数是影响直驱风机外阻抗 特性的主要因素,提出了采用*K*-means聚类算法的 分群方法及按型号分群的实用分群方法。最后利用 改进的遗传算法获取等值机的参数,实现了相同型 号直驱风机的等值和不同型号直驱风机的降阶。通 过仿真扫频对比,证明了本方案所得等值模型完全 适用于次同步振荡研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1]谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 直驱风机风电场与交流电网相互 作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学 报,2016,36(9):2366-2372.
   XIE Xiaorong,LIU Huakun,HE Jingbo,et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems
   [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2366-2372.
- [2]毕天姝,李景一. 基于聚合短路比的大型风场次同步振荡风险 初筛[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):52-59.
   BI Tianshu,LI Jingyi. Risk screening of SSO induced in large-scale wind farms based on aggregated short circuit ratio
   [J]. Power System Protection and Control,2019,47(5):52-59.
- [3]张明远,肖仕武,田恬,等. 基于阻抗灵敏度的直驱风电场并网次同步振荡影响因素及参数调整分析[J]. 电网技术,2018,42
   (9):2768-2777.
   ZHANG Mingyuan,XIAO Shiwu,TIAN Tian, et al. Analysis of SSO influencing factors and parameter adjustment for grid-connected full-converter wind farm based on impedance sensi-
- [4] YUAN Saijun, HAO Zhiguo, ZHANG Tao, et al. Impedance modeling based method for sub/sup-synchronous oscillation analysis of D-PMSG wind farm[J]. Applied Sciences, 2019, 9 (14):2831-2816.

tivity[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2768-2777.

- [5] WU Wenhua, ZHOU Leming, CHEN Yandong, et al. Sequenceimpedance-based stability comparison between VSGs and traditional grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(1):46-52.
- [6] CESPEDES M, SUN Jian. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3):1254-1261.
- [7]陈新,王赟程,龚春英,等.采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(7):2082-2094,2223.
   CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based

view of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(7):2082-2094,2223.

[8] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(11):3075-3078.

[9] 汪海蛟,何国庆,刘纯,等. 计及频率耦合和汇集网络的风电场 序阻抗模型等值方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(15): 87-92.

WANG Haijiao, HE Guoqing, LIU Chun, et al. Equivalent method for sequence impedance model of wind farms considering frequency coupling and collecting network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15):87-92.

- [10] LIU Huakun, XIE Xiaorong. Impedance network modeling and quantitative stability analysis of sub/sup-synchronous oscillations for large-scale wind power systems [J]. IEEE Access, 2018,6:34431-34438.
- [11] PULGAR-PAINEMAL H A, SAUER P W. Towards a wind farm reduced-order model[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(8):1688-1695.
- [12] 舒进,袁剑,都劲松. 基于锥互补法的 crowbar 投入 DFIG 风电 机群电磁暂态等值[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(22): 122-128.

SHU Jin, YUAN Jian, DU Jinsong. Electromagnetic transient equivalent of DFIG wind generator group with crowbar using CCA[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 122-128.

- [13] 蔺红,晁勤. 直驱永磁同步风力发电系统的降阶模型研究[J].
   电网技术,2012,36(8):145-151.
   LIN Hong, CHAO Qin. Analysis and research on reduced model of direct-drive permanent magnet wind power generation system[J]. Power System Technology,2012,36(8):145-151.
- [14] 饶日晟,张亚丽,叶林. 直驱式永磁同步风电机组的风电场降 阶等值模型[J]. 广东电力,2019,32(6):9-17.
   RAO Risheng,ZHANG Yali,YE Lin. Equivalent model of order reduction of wind power plant with DD-PMSG[J]. Guangdong Electric Power,2019,32(6):9-17.
- [15] LIU H Z, CHEN Z. Aggregated modelling for wind farms for

power system transient stability studies [C] //Asia-Pacific Power & Energy Engineering Conference. Shanghai, China: IEEE, 2012;1-6.

- [16] 孙超强,潘学萍,潘生云,等.风电场集电网络等值模型结构分析及参数辨识[J].电力自动化设备,2020,40(10):85-91.
   SUN Chaoqiang, PAN Xueping, PAN Shengyun, et al. Equivalent model structural analysis and parameter identification of wind farm collector network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(10):85-91
- [17] 张保会,李光辉,王进,等.风电接入电力系统故障电流的影响 因素分析及对继电保护的影响[J].电力自动化设备,2012,32 (2):1-8.

ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.

[18] 赖玉霞,刘建平. K-means 算法的初始聚类中心的优化[J]. 计 算机工程与应用,2008,44(10):147-149.

LAI Yuxia, LIU Jianping. Optimization study on initial center of *K*-means algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(10):147-149.

#### 作者简介:



袁赛军(1995—),男,硕士研究生,主 要研究方向为新能源并网控制与稳定性 (**E-mail**:vsj201388@stu.xjtu.edu.cn);

郝治国(1976—),男,教授,博士研究 生导师,博士,主要研究方向为变压器新型 保护与安全运行、新能源电力系统保护与控 制(**E-mail**;zhghao@mail.xjtu.edu.cn)。

袁赛军

(编辑 王欣竹)

# Equivalent method of PMSG-based wind farm suitable for subsynchronous oscillation analysis

YUAN Saijun<sup>1,2</sup>, HAO Zhiguo<sup>2</sup>, SHU Jin<sup>3</sup>

(1. Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Hunan Electric Power Company Limited,

Changsha 410004, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to solve the problems of impedance modeling difficulty and node limitation of numerical simulation of large-scale PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)-based wind farm, considering the basic principle of impedance analysis method, taking the consistence between the external impedance characteristics of PMSG-based wind farm before equivalence and that after equivalence as the goal, an equivalent method of PMSG-based wind farm suitable for subsynchronous oscillation analysis is proposed. The method contains two steps: clustering aggregation based on impedance sensitivity analysis and equivalent order reduction based on genetic algorithm. Taking wind farms with the same type and different types of PMSGs as examples, the comparison of the external impedance characteristics of PMSG-based wind farm between before and after equivalence is analyzed. The result shows that the equivalent reduced-order model of large-scale PMSG-based wind farm can be realized by the proposed method. The external impedance characteristics of the PMSG-based wind farm before and after equivalence error can be quantified.

Key words: wind farm equivalence; subsynchronous oscillation; impedance analysis method; PMSG; sensitivity analysis; genetic algorithm

## 附录 A

le A1 Network paran	neters of some actual	PMSG-based wind
网络元件	参数	参数值
	电阻/ (Ω·km <sup>-1</sup> )	0.161
35 kV 集电线路	电抗/ (Ω·km <sup>-1</sup> )	0.114
	长度/km	6.219
	短路电压百分比/%	6.5
0.69 kV/35 kV 箱变	额定容量/MW	2
	箱变台数	10
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	额定容量/MW	1.5
<u>目、沙心</u> 八八八	风机台数	10
80 項函額 0 0 0	c 160 c 1.04	<ul> <li>平均适应度函数值</li> <li>最优适应度函数值</li> <li>(x: 60) (x) (0.6846)</li> <li>(x) (0.6846)</li> <li>(x)</li></ul>

表 A1 某实际直驱式风电场网络参数

Table <u>l</u> farm





代

夜A2 个内主与了百旦把八机参数						
Table A2Parameters of 5 different-typed PMSGs						
编号	电流/A	Kp	$K_{\rm i}$	$K_{\rm ip}$	K <sub>ii</sub>	L
1	1 800	0.085	32	0.25	355	$1.5 \times 10^{-4}$
2	900	0.85	320	0.5	200	$1.5 \times 10^{-4}$
3	1 500	0.5	2	0.05	50	$1.0 \times 10^{-4}$
4	1 200	0.05	500	0.85	160	$2.0 \times 10^{-4}$
5	750	0.25	25	0.03	700	$1.5 \times 10^{-4}$

表 A2 不同型号 5 台直驱风机参数

表 A3 不同型号机群的等值模型参数

Table A3 E	quivalent model	parameters of	different-typed	PMSGs
------------	-----------------	---------------	-----------------	-------

	-		_					
等值方案		电流/A	$K_{\rm p}$	$K_{\rm i}$	$K_{\rm ip}$	K <sub>ii</sub>	<i>L</i> /mH	误差/%
单台等值		6 150	0.211	26	0.010	123	0.684	10.8
等值为2台机	1号	4 060	0.134	30	0.018	163	0.108	5.07
	2号	2 090	0.485	146	0.110	54	0.100	5.07
等值为3台机	1号	2 100	0.469	29	0.025	141	0.530	
	2号	2 030	0.093	31	0.688	219	0.520	1.89
	3号	2 020	0.496	8	0.022	145	0.630	