

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190575

基于主成分分析法的直驱式风电场分群方法

颜湘武, 李君岩

(河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 为了建立较为精确的风电场等值模型, 提出了一种基于主成分分析法的直驱式风电场分群方法。首先对直驱式风电机组进行建模和分析, 得到了表征风电机组运行状态的全部状态变量。然后利用主成分分析法提取了3个主导变量, 它们代表了全部状态变量90%以上的信息, 可较准确地反映机组的运行点。最后为了进行对比分析, 在算例中分别以3个主导变量和风速为分群指标进行分群计算, 并在 Matlab/Simulink 平台上搭建了风电场的详细模型、以主导变量分群的等值模型及以风速分群的等值模型。通过比较三种模型在风速波动及电网故障情况下动态特性的仿真结果, 验证了所提分群方法的正确性及较高的精确性。以该方法分群建立的风电场等值模型的精确性较高。

关键词: 主成分分析法; 直驱式风电场; 分群指标; 状态变量; 主导变量

Grouping method of direct drive wind farm based on principal component analysis

YAN Xiangwu, LI Junyan

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: In order to establish a more accurate wind farm equivalent model, a direct-drive wind farm clustering method based on principal component analysis is proposed. Firstly, all the state variables that characterize the operating state of the wind turbine are obtained by modeling and analyzing the direct-drive wind turbine. Then, three dominant variables are extracted by principal component analysis, which represent more than 90% of all state variables. It can accurately reflect the operating point of the wind turbine. Finally, for comparative analysis, the hierarchical clustering algorithm is used for clustering calculation with three dominant variables and wind speed as the grouping index. The detailed model of wind farm, the equivalent model of dominant variable grouping and the equivalent model of wind speed grouping are built on Matlab/Simulink platform. By comparing the simulation results of the dynamic characteristics of the three models under wind speed fluctuation and grid fault condition, the correctness and high accuracy of the proposed clustering method are verified. The wind farm equivalent model established by this method has higher accuracy.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E20185021134) and Science and Technology Project of State Grid Headquarters: Research on Inertia, Damping and Primary Adjustment Method of Doubly-fed Induction Wind Turbine (No. SGT YHT/18-JS-206).

Key words: principal component analysis; direct-drive wind farm; grouping indicator; state variables; dominant variable

0 引言

在新能源开发中, 风电是除水能发电外, 技术最成熟、最具有大规模开发和商业开发条件的发电

形式^[1]。但与化石能源相比^[2], 风力发电输出功率具有明显的间歇性和波动性^[3], 随着风电场的装机容量大幅增长, 大规模风电并网运行一定会给电网的电能质量、安全稳定运行带来极大的影响^[4]。研究大规模风电并网后电网运行特性的首要问题是风电场建模, 而分群指标的选取是风电场等值建模的关键步骤。

由于风电场地形地貌、机组排列位置、尾流效

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(E20185021134); 国网总部科技项目资助“双馈感应风力发电机惯量、阻尼及一次调节方法研究”(SGTYHT/18-JS-206)

应及时滞效应的影响,风电场内每台机组的运行点会有很大的差别。大型风电场等值建模一般以机组具有相同或相近的运行点为分群原则,所以选取的分群指标要能反映机组的运行点,以何种指标进行分群是风电场等值建模的研究热点。文献[5-6]以风速作为分群指标,将风速相近的风电机组归为一组,文献[7]以桨距角动作情况作为分群指标,但风速、桨距角大小不是决定风电机组运行点的唯一因素,且大型风电场的风速差异很大会导致分群数目较多;文献[8]以风电机组的有功出力、无功参考值、机组类型、以及出口电压这4个状态变量作为分群指标,文献[9]选用双馈式风电机组的全部13个状态变量作为分群指标,虽然这两种分群方法可以较精确地反映风电机组的运行状态,但实际应用于大型风电场时计算量太大。

直驱式风电机组由于具有较强的低电压穿越能力等技术优势^[10],相较于双馈型风电机组具有相当大的经济性及可靠性优势^[11],将会逐步成为风电场的主流机组。风电场等值建模一般以风电机组具有相同或相近的运行点为分群原则,虽然以风电机组的全部状态变量为分群指标能精确地反映机组的运行点,但计算量会随着风电场规模的增加而增加,而且各变量间具有一定的相关性,考虑全部状态变量不仅没有必要而且在实际应用中也不可能实现。本文提出了一种基于主成分分析法的直驱式风电场的分群方法,通过主成分分析法提取了能反应90%以上风电机组运行状态信息的3个主导变量为分群指标,既保证了分群指标能较大程度的反应风电机组的运行点,又减少了计算量,有较强的实用价值。

1 直驱式风电机组的全部状态变量

1.1 风力机的运行特性

基于主成分分析法选取主导变量作为分群指标首先要通过研究风电机组的运行特性得到反映机组运行点的全部状态变量。

风力机从风中捕获的功率可表示为^[12]

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

其中:

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (3)$$

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (4)$$

风力机输出的机械转矩为

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (5)$$

式中: P_m 为风力机的输出功率; C_p 为功率系数; ω_m 为风力机转速; v 为输入风速; λ 为叶尖速比; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; β 为叶片桨距角; T_m 为风力机的机械转矩。由式(1)~式(5)可知, ω_m 、 T_m 、 β 这三个状态变量表征了风力机的运行特性。

1.2 永磁同步发电机的运行特性

本文在 d 、 q 、 0 坐标系中建立永磁同步发电机的数学模型,其定子电压方程为^[13]

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q + R_s i_d \\ u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + R_s i_q + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (6)$$

$$\omega_e = \omega_r \cdot p_n \quad (7)$$

发电机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \quad (8)$$

发电机的输出功率为

$$P_s = T_e \omega_r \quad (9)$$

式中: u_d 、 u_q 为定子电压的直轴、交轴分量; i_d 、 i_q 为定子电流的直轴、交轴分量; R_s 为定子电阻; L_d 、 L_q 为定子绕组直轴、交轴电感; ω_r 为发电机的转子转速; p_n 为极对数; ψ_f 为转子磁链; T_e 为电磁转矩; ω_e 为转子的电角频率。由式(6)~式(9)可知, u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 T_e 、 ω_r 这六个状态变量表征了永磁同步发电机的运行特性。

1.3 传动系统的运行特性

直驱式风电机组风力机的叶轮和发电机的转子直接连接进行驱动,与风力机相比发电机转子的转动惯量很小,可以计入风力机的转动惯量,这样得到的单质量块数学模型为^[14]

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - F\omega_r - T_e) \quad (10)$$

式中: J 为风力机与发电机转子的总转动惯量; F 为转矩阻尼系数; 由于传动系统没有齿轮箱,所以风力机的转速与发电机转速相等,即 $\omega_r = \omega_m$ 。由式(10)可知, ω_m 、 ω_r 、 T_e 、 T_m 这四个状态变量表征了传动系统的运行特性。通过以上分析可得反映整个风电机组运行特性的全部状态变量为 β 、 T_m 、 T_e 、 ω_m 、 ω_r 、 u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 。

2 主成分分析法提取主导变量

2.1 主成分分析法的原理

主成分分析法^[15]是一种统计分析方法。在处理实际问题中,多个变量之间可能存在一定的相关性,当变量的个数较多且变量之间存在复杂的关系时,该方法通过降维技术将原来众多具有一定相关性的变量,转化为少数几个综合指标(即主成分),其中每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息,且所含信息互不重复,这样更容易抓住事物的主要矛盾,使问题简化。

主成分分析法通过线性变换把给定的一组相关变量转成另一组不相关的变量,在数学变换中按照特征值由大到小的顺序排列,则第一个新变量的方差最大,所代表的信息最多,称为第一主成分,依次递推。通常前几个主成分就可以代表绝大部分的原始信息,一般提取的主成分的数量 k 能代表原始变量的 85% 以上的信息便可^[16]。

2.2 提取主导变量的计算步骤

由直驱式风电机组的运行特性可知,其运行状态由 β 、 T_m 、 T_e 、 i_d 、 i_q 、 u_d 、 u_q 、 ω_r 、 ω_m 这 9 个变量决定,当风速扰动或系统侧故障时,直驱式风电机组的控制系统将按照这 9 个状态变量的初值与扰动量进行控制,即这 9 个状态变量的初值可以反映直驱式风电机组的初始运行点来进行分群计算,得到的分群结果不会受到风速大小波动的影响^[17]。因此本文选用这 9 个状态变量的初值进行主成分分析,提取主导变量的计算步骤如下:

(1) 在某一时刻下,由每台机组的实测数据可得输入风速及桨距角,再由厂家提供的转速曲线可得到 ω_r 、 ω_m ,通过式(1)~式(5)可得到 T_m 。在忽略机械损耗及铜耗、铁耗的情况下,风力机的输出功率与发电机的输出功率相等,由式(9)可得 T_e ,再由式(8)可得到 i_q , i_d 一般为定值 0,最后通过式(6)得到 u_d 、 u_q ,将上述原始变量的初值按行排列组成矩阵 X 。

(2) 对 X 进行数据标准化,使其均值变为零。

(3) 求 X 的方差矩阵,再计算得到 9 个特征值 $\lambda_i (i=1,2,\dots,9)$,则第 i 个主成分的方差贡献率 p_i 定

义为^[18]

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^9 \lambda_j} \quad (11)$$

(4) 将特征向量按特征值由大到小排列,取前 k 个按行组成矩阵 P 。 k 值便为提取的主导变量的个数,通过对矩阵 P 进行分析,可确定 9 个状态变量中的主导变量。

3 风电场算例的分群计算

本文选用某风电场内 30 台直驱式风电机组为例进行分群计算。直驱式永磁同步风电机组的型号为金风 87/1500,其额定容量为 1.5 MW,额定风速为 9.9 m/s。

本文根据风电场的运行数据选择某一时刻的风速作为直驱式风电机组的初始输入风速,如表 1 所示,再根据本文提出的提取主导变量的计算步骤(1),可得 30 台机组的 9 个状态变量的初值如表 2 所示。

由于 i_d 恒定为 0,所以不参加计算。根据计算步骤将矩阵 X 进行数学变换,所得特征值及其贡献率、累计贡献率如表 3 所示。经过线性变换后,第一个主成分的特征值最大,贡献率也最大,说明其包含的信息最多,其余主成分的特征值、贡献率依次递减,包含的信息也越来越少。由累计贡献率可知,第一主成分和第二主成分共代表了 98.6% 的原始信息,即 $k=2$ 便可满足要求。特征值 λ_1 、 λ_2 对应的特征向量如表 4 所示,这两个特征向量组成了矩阵 P 。

由表 4 中第一个特征向量可知,第一主成分主要是转矩、转速及定子电压直轴、交轴分量、电流交轴分量这几个状态变量的组合,又由式(6)~式(8)可知, u_d 、 u_q 、 i_q 由转矩、转速决定,且 $T_m=T_e$, $\omega_r=\omega_m$,所以第一主成分代表了电磁转矩、发电机转速这两个主导变量。由第二个特征向量可知,第二主成分主要代表了桨距角这一个主导变量。所以,本文选用桨距角、电磁转矩、发电机转速这三个变量作为主导变量,它们可较准确地反映风电机组的运行点。

表 1 初始风速表

Table 1 Initial anemometer

风机编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
初始风速/(m/s)	10	9.24	10	8.21	10	10	8.21	10.35	10.65	10.65
风机编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
初始风速/(m/s)	9.71	9.32	10.35	9.71	9.43	9.32	9.32	8.72	8.21	8.72
风机编号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
初始风速/(m/s)	10.35	6.94	8.21	6.94	7.64	6.94	6.94	8.21	6.94	7.64

表 2 全部状态变量的初值
Table 2 Values of all state variables

机组号	β	T_m	T_e	i_d	i_q	u_d	u_q	ω_r	ω_m
1	2.28	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
2	0	0.86	0.86	0	0.86	-0.86	1.02	1	1
3	2.28	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
4	0	0.72	0.72	0	0.72	-0.67	0.95	0.93	0.93
5	2.28	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
6	2.28	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
7	0	0.72	0.72	0	0.72	-0.67	0.95	0.93	0.93
8	5.73	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
9	8.45	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
10	8.45	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
11	0	0.96	0.96	0	0.96	-0.96	1.03	1	1
12	0	0.88	0.88	0	0.88	-0.88	1.02	1	1
13	5.73	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
14	0	0.96	0.96	0	0.96	-0.96	1.03	1	1
15	0	0.9	0.9	0	0.9	-0.9	1.03	1	1
16	0	0.88	0.88	0	0.88	-0.88	1.02	1	1
17	0	0.88	0.88	0	0.88	-0.88	1.02	1	1
18	0	0.81	0.81	0	0.81	-0.8	1.01	0.99	0.99
19	0	0.72	0.72	0	0.72	-0.67	0.95	0.93	0.93
20	0	0.81	0.81	0	0.81	-0.8	1.01	0.99	0.99
21	5.73	1	1	0	1	-1	1.03	1	1
22	0	0.52	0.52	0	0.52	-0.41	0.8	0.79	0.79
23	0	0.72	0.72	0	0.72	-0.67	0.95	0.93	0.93
24	0	0.52	0.52	0	0.52	-0.41	0.8	0.79	0.79
25	0	0.63	0.63	0	0.63	-0.55	0.89	0.87	0.87
26	0	0.52	0.52	0	0.52	-0.41	0.8	0.79	0.79
27	0	0.52	0.52	0	0.52	-0.41	0.8	0.79	0.79
28	0	0.72	0.72	0	0.72	-0.67	0.95	0.93	0.93
29	0	0.52	0.52	0	0.52	-0.41	0.8	0.79	0.79
30	0	0.63	0.63	0	0.63	-0.55	0.89	0.87	0.87

表 3 特征值、贡献率、累计贡献率的值
Table 3 Values of characteristic value, contribution rate and cumulative contribution rate

特征值	贡献率	累计贡献率
7.118 1	0.889 8	0.889 8
0.790 2	0.098 8	0.988 6
0.090 8	0.011 4	1
0.000 8	0.000 1	1
0.000 1	0	1
0	0	1
0	0	1
0	0	1

表 4 特征向量的值
Table 4 Values of eigenvectors

特征变量	第一主成分的构成	第二主成分的构成
β	0.215 0	-0.914 0
T_m	0.372 3	-0.047 7
T_e	0.372 3	-0.047 7
i_q	0.372 3	-0.047 7
u_d	-0.373 7	0.001 1
u_q	0.366 1	0.211 0
ω_r	0.363 5	0.237 9
ω_m	0.363 5	0.237 9

在风电场内以主导变量作为分群指标进行分群计算时, 考虑到桨距角大于 0 的风电机组会运行于额定工作点, 所以分群时首先将桨距角大于 0 的机组归为一群, 其余风电机组再根据电磁转矩、转子转速这两个状态变量利用层次聚类算法^[19]进行分群, 限于篇幅不再详细介绍。同时, 为了进行对比分析, 本文以风速为分群指标用相同的层次聚类算法分群将 30 台风电机组分为 4 组, 分群结果及等值机组的输入风速如表 5、表 6 所示, 选取不同的分群指标会导致分群结果相差较大。

表 5 以主导变量为分群指标的分群结果

Table 5 Grouping results with dominant variables as a grouping indicator

等值机组编号	分群结果	等值风速/(m/s)
1	22, 24, 26, 27, 29	6.94
2	2, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 20	9.3
3	4, 7, 19, 23, 25, 28, 30	8.1
4	1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 13, 21	9.9

表 6 以风速为分群指标的分群结果

Table 6 Grouping results with wind speed as a grouping indicator

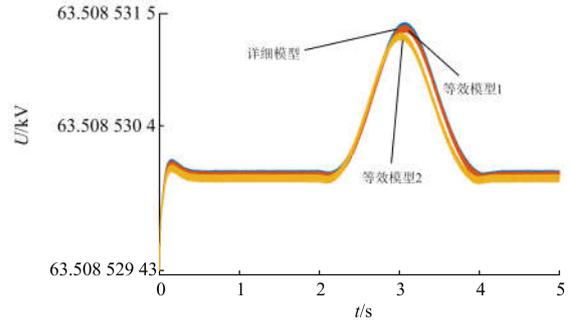
等值机组编号	分群结果	等值风速/(m/s)
1	22, 24, 26, 27, 29	6.94
2	2, 12, 16, 17, 15	9.33
3	4, 7, 18, 19, 20, 23, 25, 28, 30	8.21
4	1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 21	9.86

4 仿真分析

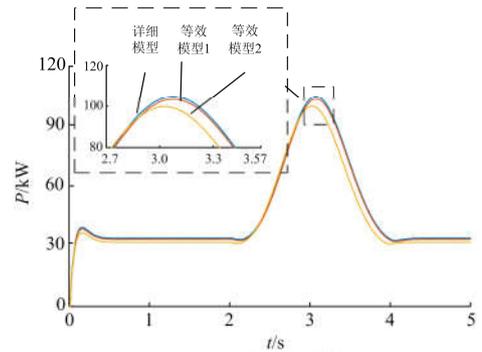
根据得到的两种分群结果将 30 台风电机组等值为 4 台机组, 等值机组的参数采用容量加权法^[20]计算, 风电场内的集电系统采用等效损耗法^[21]计算等值电阻。本文在 Matlab/Simulink 平台上搭建了风电场的详细模型、以主导变量分群的等值模型、以风速分群的等值模型, 并分别在风速波动及电网故障时进行仿真, 通过与风电场详细模型的动态特性进行比较, 验证本文提出的分群方法的合理性与有效性。

(1) 在风电系统仿真中, 通常用阵风来考察系统在风速扰动下的动态特性。阵风在 2 s 时开始, 4 s 时结束, 阵风的最大值为 4 m/s, 可得风电场详细模型、以主导变量分群的等效模型 1 及以风速分群的等效模型 2 在风电场出口的有功功率、无功功率、电压的变化如图 1 所示, 等效模型 1 的有功功率、无功功率、出口电压的变化趋势与详细模型的变化

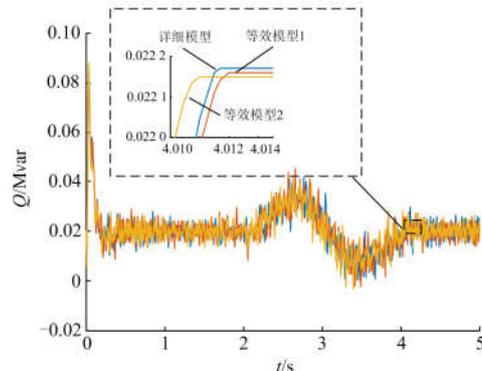
基本相同, 而等效模型 2 的变化趋势误差较大。可得当风速波动时, 主导变量比风速更能精确的反映风电机组的运行点, 以主导变量分群比以风速分群建立的等值模型更能反映整个风电场并网点动态特性。



(a) 电压的特性



(b) 有功功率的特性



(c) 无功功率的特性

图 1 风速波动时风电场的运行特性

Fig. 1 Operating characteristics of wind farms when wind speed fluctuates

(2) 在 $t=2$ s 时风电场并网点发生三相短路故障, 故障持续时间为 0.2 s, 可得详细模型、以主导变量分群的等效模型 1 及以风速分群的等效模型 2 的有功功率、无功功率、出口电压的特性如图 2 所示。由图 2(a)可知, 两种等值模型与详细模型的出口电压的特性基本相同, 但由图 2(b)、图 2(c)可知

等效模型 1 与详细模型的有功、无功功率的特性基本相同，而等效模型 2 的变化趋势误差较大。可得电网故障时，主导变量比风速更能精确地反映风电机组的运行点，以主导变量分群比以风速分群建立的等值模型更能反映整个风电场并网点的动态特性。

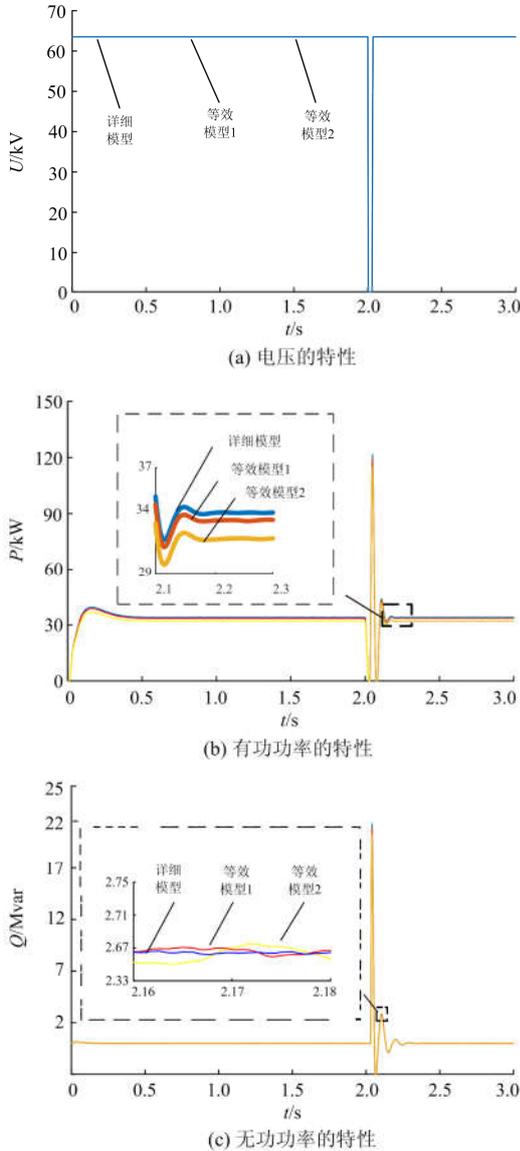


图 2 电网故障时风电场的运行特性
Fig. 2 Operating characteristics of wind farms under grid faults

5 结论

针对由直驱永磁同步风电机组组成的大型风电场，本文利用主成分分析法提取了桨距角、电磁转矩、发电机转速这三个状态变量作为分群指标，由于这三个主导变量能代表全部状态变量 90% 以上的

信息，所以对于包含几百台风电机组的大型风电场，减小计算量的同时，其比风速更能准确地反映风电机组的运行点。由风电场详细模型及两种等效模型在风速波动及电网故障情况下的仿真结果可知，以主导变量分群建立的风电场等值模型的有功功率、无功功率及出口电压的特性更接近详细模型，即本文所提分群方法是合理的、有效的。

参考文献

[1] 黄国栋, 许丹, 丁强, 等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 162-170.
HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. Review of power grid scheduling research considering thermoelectricity and large-scale wind power[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 162-170.

[2] 杨倩鹏, 林伟杰, 王月明, 等. 发电形式的竞争趋势与替代时间研究[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 1-7.
YANG Qianpeng, LIN Weijie, WANG Yueming, et al. Research on competition trend and replacement time of power generation form[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 1-7.

[3] 方云熠, 曾喆昭, 刘晴, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪非线性抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 145-151.
FANG Yunyi, ZENG Zhaozhao, LIU Qing, et al. Maximum power tracking nonlinear anti-interference control for permanent magnet direct drive wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 145-151.

[4] 田蓓, 于珍, 李旭涛, 等. 考虑多风电场功率相关性的概率潮流联合分布计算[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 71-77.
TIAN Wei, YU Zhen, LI Xutao, et al. Probabilistic tidal joint distribution calculation considering multi-wind farm power correlation[J]. Electric Power, 2017, 50(10): 71-77.

[5] 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. Grouping method of wind turbine units in grid-connected wind farm under wind speed fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 42-46.

[6] 黄梅, 万航羽. 在动态仿真中风电场模型的简化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 147-152.
HUANG Mei, WAN Hangyu. Simplification of wind farm model in dynamic simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 147-152.

[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. Research on dynamic equivalent model of wind farm of double feed unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 72-77.
- [8] 杜亚静. 风电场多尺度动态聚合模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
DU Yajing. Research on multi-scale dynamic polymerization model of wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [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 of wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 11-19, 24.
- [10] 王永强, 喻俊志, 冯静安, 等. 永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 34-42.
WANG Yongqiang, YU Junzhi, FENG Jing'an, et al. Low/high voltage ride through of permanent magnet direct drive wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 34-42.
- [11] 孟杰, 潘巧波, 高庆水, 等. 大型直驱风电机组快速响应优化控制策略[J]. 中国电力, 2017, 50(9): 165-170.
MENG Jie, PAN Qiaobo, GAO Qingshui, et al. Fast response optimization control strategy for large direct drive wind turbines[J]. Electric Power, 2017, 50(9): 165-170.
- [12] 王武兴. 直驱式永磁风力发电系统最大功率跟踪研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
WANG Wuxing. Research on maximum power tracking of direct-drive permanent magnet wind power generation system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [13] 张仰飞, 李海峰, 王伟胜, 等. 直驱永磁同步风力发电机的电气参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 150-153.
ZHANG Yangfei, LI Haifeng, WANG Weisheng, et al. Identification of electrical parameters of direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 150-153.
- [14] 李林. 永磁直驱同步风力发电机风电场的暂态聚合建模研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
LI Lin. Transient polymerization modeling of permanent magnet direct-drive synchronous wind turbine wind farm[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2016.
- [15] YANG P, TSAI J, CHOU J. PCA-based fast search method using PCA-LBG-based VQ codebook for codebook search[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1332-1344.
- [16] VASWANI N, NARAYANAMURTHY P. Static and dynamic robust PCA and matrix completion: a review[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(8): 1359-1379.
- [17] 曹娜, 于群. 风电场建模技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [18] 仲明月. 基于主导变量分层聚类的风电场动态等值研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
ZHONG Mingyue. Research on dynamic equivalence of wind farms based on hierarchical clustering of leading variables[D]. Chengdu: Xihua University, 2018.
- [19] 段明秀. 层次聚类算法的研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
DUAN Mingxiu. Research and application of hierarchical clustering algorithm[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [20] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 162-169.
MI Zengqiang, SU Xunwen, YANG Qixun, et al. Multi-machine characterization of dynamic equivalent model of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [21] 夏玥, 李征, 蔡旭, 等. 基于直驱式永磁同步发电机组的风电场动态建模[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1439-1445.
XIA Yue, LI Zheng, CAI Xu, et al. Dynamic modeling of wind farm based on direct-drive permanent magnet synchronous generator set[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1439-1445.

收稿日期: 2019-05-21; 修回日期: 2019-06-12

作者简介:

颜湘武(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换、新型储能与节能技术; E-mail: xiangwuy@163.com

李君岩(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为直驱永磁同步发电机建模、风电场建模与控制。

E-mail: lijunyan1994@163.com

(编辑 张爱琴)