

六相电励磁同步风力发电机组的稳态模型

赵霞¹, 周桢钧^{1,2}, 余绿绿¹, 罗兰¹, 颜伟¹, 余娟¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国家电网九江供电公司, 江西 九江 332000)

摘要: 六相电励磁同步风力发电机(SP-EESWG)是一种特殊的变速恒频风电机组。以风电机组各部分的数学模型为基础,详细考虑风力机的风能利用特性、整流-逆变电路的稳态特性,以及机组所采用的最大风能跟踪控制、直流电容电压控制和并网逆变器控制对稳态特性的影响,建立了 SP-EESWG 的稳态模型,并将其应用于含 SP-EESWG 电网的潮流计算。最后,以单机无穷大系统和 IEEE 14 节点系统两个算例验证了所提模型的正确性和有效性。仿真结果表明,不同风速情况下,现有文献广泛采用的风电机组简化潮流模型与该模型的计算结果均有不同程度的误差。其中,一阶和二阶简化模型的误差较大,不宜用于 SP-EESWG 的稳态特性分析;当风速处于额定风速附近时,三阶简化模型与该模型的误差可以忽略。

关键词: 六相电励磁同步发电机; 稳态模型; 潮流分析; 控制策略

Steady-state model of six-phase electrically excitation synchronous wind generators

ZHAO Xia¹, ZHOU Zhenjun^{1,2}, YU Lulu¹, LUO Lan¹, YAN Wei¹, YU Juan¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Jiujiang Power Supply Company, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Six-phase electrically excitation synchronous wind generator (SP-EESWG) is a special kind of variable speed constant frequency wind generator. Based on the mathematic models of each part, a steady-state model for SP-EESWG is proposed and applied to power flow analysis by taking the utilization characteristics of wind energy, the steady-state characteristics of AC-DC-AC circuit, and the Maximum Power Point Tracking (MPPT), the excitation voltage control, as well as the unity-power factor control into consideration. A single-machine infinite-bus system and the IEEE14-bus system including SP-EESWGs is used to verify the model proposed. Simulation results also prove that the widely used simplified power flow models for wind generators, especially the first- and second-order model, cannot be applied to steady-state analysis of SP-EESWG because of the large errors presented, and the third-order model can be used as an alternative of the model proposed only for the steady state under or near the rated wind speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307186).

Key words: SP-EESWG; steady-state model; power flow analysis; control strategy

中图分类号: TM614

文章编号: 1674-3415(2016)01-0077-08

0 引言

六相电励磁同步风力发电机组(Six-Phase Electrically Excitation Synchronous Wind Generator, SP-EESWG)采用六相电励磁同步电机作为发电机,是一种特殊的变速恒频风电机组。六相电励磁同步电机(又称双定子绕组同步电机),与常规同步电机的区别在于定子侧有两套相差一定角度(通常为 30°)

的三相绕组^[1]。SP-EESWG 具有机组成本低、发电效率高、可靠性高、转矩脉动小的特点,在重庆武隆、山东栖霞和内蒙通辽的风电场中均有应用。

风电机组的稳态模型是对含风电机组电力系统进行潮流计算、分析和评估的基础^[2-5]。部分研究仅简单考虑风电机组的控制特性,采用风速的分段显式函数(如线性函数^[6-7]、二次函数^[8-9]、三次函数^[10-11]或指数函数^[12]等)来描述风电机组的最大风能跟踪特性;按无功恒定^[7]、电压恒定^[9]、功率因数恒定^[6],或者无功是有功或电压的函数^[10-11]来考

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307186)

虑风电机组的无功电压特性(下文称为“简化模型”)。另有一些研究详细考虑风电机组的稳态等值电路和控制特性,文献[13]考虑了转速控制规律的影响,建立了双馈感应风电机组的稳态模型,并将其用于计算机组的无功功率极限;文献[14]考虑详细的风能利用特性和异步发电机的稳态等值电路,提出异步风力发电系统的RX模型;文献[15]对RX模型的收敛性进行改进,并提出异步风力发电系统的PZ模型,得出了风电机组输出功率与叶尖速比和滑差之间的函数关系;文献[16]进一步将风力机的详细特性纳入上述异步风力发电系统,提出将风电机组接入节点作为功率可变的PQ节点、异步发电机作为RX等值电路模型;文献[17]研究了直驱永磁同步风力发电机组在恒电压控制方式下的潮流模型;文献[18]详细考虑了机组所采用的最大功率跟踪控制,提出无刷双馈异步风力发电机的潮流模型。

目前,尚未见文献报道SP-EESWG的稳态模型。作为一种特殊的变速恒频风电机组,显然不能采用上述基于永磁电机、感应发电机或双馈电机风电机组的稳态模型,是否可以继续沿用风电机组的简化模型则有待进一步研究。

本文以SP-EESWG各部分的数学模型为基础,详细考虑风力机的风能利用特性、整流-逆变电路的稳态特性,以及SP-EESWG所采用的最大风能跟踪控制、直流电容电压控制和并网逆变器控制对稳态特性的影响,建立SP-EESWG的稳态模型,并将其用于含SP-EESWG电网的潮流计算。以重庆武隆某风电场选用的850 kW风电机组为原型,用单机无穷大系统和IEEE-14节点系统两个算例验证所提稳态模型的有效性,并分析现有风电机组简化潮流模型对SP-EESWG潮流计算的适用性。

1 SP-EESWG各部分数学模型

1.1 SP-EESWG的结构

SP-EESWG由风力机、齿轮箱、发电机、不可控整流桥和并网逆变器构成,其结构示意图如图1(图中未标识逆变器出口的滤波电路)。发电机采用六相电励磁同步发电机,两套定子绕组输出频率变

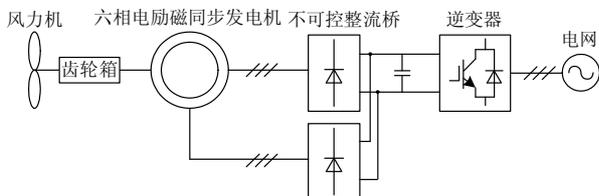


图1 六相电励磁同步风力发电机组示意图

Fig. 1 Schematic diagram of six-phase electrically synchronous wind generators

化的交流电,经机侧两套不可控整流桥整流以及网侧逆变器的正弦脉宽调制(SPWM)转换为频率恒定的交流电馈入地区电网。

1.2 风力机

根据Betz理论,风力机捕获的机械功率和机械转矩分别为

$$P_w = 0.5\rho AC_p V_w^3 \quad (1)$$

$$T_w = P_w / \omega_w \quad (2)$$

式中: ρ 是空气密度; A 是风机叶片的扫掠面积; V_w 是风速; C_p 为风能利用系数,是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的非线性函数(其中 $\lambda = \omega_w R / V_w$, R 为叶片半径, ω_w 为风力机的角速度),如文献[19]给出的一种典型函数关系为

$$\begin{cases} C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 传动部分

图1所示SP-EESWG的机械传动部分由风力机、齿轮箱和发电机构成。采用等效集中质量法^[19],将风力机和齿轮箱等效为一个质块,发电机转子等效为另一质块,不计两质块自身的摩擦,传动部分的两质块模型为

$$\begin{cases} 2H_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - k_s \theta_s - D_s (\omega_w - \omega_e) \\ 2H_g \frac{d\omega_e}{dt} = k_s \theta_s + D_s (\omega_w - \omega_e) - T_e \\ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_B (\omega_w - \omega_e) \end{cases} \quad (4)$$

式中: H_w 、 H_g 分别为风力机和发电机的惯性常数, ω_B 为基准电角速度; ω_e 为发电机转速; T_e 为发电机的电磁转矩; k_s 为传动轴的刚性系数; D_s 为两个等效质块之间的阻尼系数; θ_s 为风力机与发电机转子的相对电角位移。式中除惯性常数(H_w 、 H_g)和 ω_B 为有名值(单位分别为s和rad/s)外,其余各量均为标幺值(p.u.)。

1.4 六相同步发电机

不计阻尼绕组的影响,对于六相电机的两套三相定子绕组和转子 d 轴上的励磁绕组,基于双 dq 经典Park变换^[1]和公共磁链假设(即不计 d 轴和 q 轴上定子和转子绕组之间的互漏以及定子 dq 绕组之间的交叉互感,但考虑 d/q 轴上两套定子绕组之间的互漏),采用 X_{ad} 可逆基值系统^[20],定子绕组按

发电机惯例, 转子绕组按电动机惯例, 则六相电机在转子 dq 坐标系下的标幺电压方程和磁链方程为

$$\begin{cases} u_{d1} = D\psi_{d1} - \omega_e \psi_{q1} - r i_{d1} \\ u_{q1} = D\psi_{q1} + \omega_e \psi_{d1} - r i_{q1} \\ u_{d2} = D\psi_{d2} - \omega_e \psi_{q2} - r i_{d2} \\ u_{q2} = D\psi_{q2} + \omega_e \psi_{d2} - r i_{q2} \\ u_f = D\psi_f + r_f i_f \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \psi_{d1} = -x_{d1} i_{d1} - x_{d12} i_{d2} + x_{ad} i_f \\ \psi_{q1} = -x_{q1} i_{q1} - x_{q12} i_{q2} \\ \psi_{d2} = -x_{d2} i_{d2} - x_{d12} i_{d1} + x_{ad} i_f \\ \psi_{q2} = -x_{q2} i_{q2} - x_{q12} i_{q1} \\ \psi_f = x_f i_f - x_{ad} i_{d1} - x_{ad} i_{d2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: D 为标幺微分算子; u 、 i 、 ψ 和 r 分别表示电压、电流、磁链和电阻, 下标 $d1$ 、 $d2$ 、 $q1$ 、 $q2$ 和 f 分别表示 dq 轴等效定子绕组和励磁绕组; x_{d1} 、 x_{d2} 、 x_{q1} 、 x_{q2} 和 x_f 分别表示对应绕组的全电抗; x_{d12} 和 x_{q12} 为 d 轴和 q 轴上两套等效定子绕组的互感抗; x_{ad} 为 d 轴电枢反应电抗。

取六相电机单套定子绕组的额定容量为容量基准, 六相电机的标幺电磁转矩 T_e 及输出有功 P_g 和无功 Q_g 分别为

$$\begin{cases} T_e = \psi_{d1} i_{q1} + \psi_{d2} i_{q2} - \psi_{q1} i_{d1} - \psi_{q2} i_{d2} \\ P_g = u_{d1} i_{d1} + u_{q1} i_{q1} + u_{d2} i_{d2} + u_{q2} i_{q2} \\ Q_g = u_{q1} i_{d1} - u_{d1} i_{q1} + u_{q2} i_{d2} - u_{d2} i_{q2} \end{cases} \quad (7)$$

假设六相电机两套定子绕组的参数和运行条件相同, 则有:

$$\begin{cases} \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} = \sqrt{u_{d2}^2 + u_{q2}^2} \\ u_{d1} i_{d1} + u_{q1} i_{q1} = u_{d2} i_{d2} + u_{q2} i_{q2} \end{cases} \quad (8)$$

1.5 整流-逆变环节

由三相不可控整流桥直流侧平均电压与交流侧相电压基波分量的关系^[21], 可以近似认为直流电容电压 U_d 与六相电机定子电压满足以下约束方程:

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} \quad (9)$$

忽略整流-逆变环节的固有有功损耗, 直流电容的充放电过程可以近似表示为

$$C \frac{dU_d}{dt} = (P_g - P) / U_d \quad (10)$$

式中: C 为直流电容; P 为逆变器输出的有功(也即整个风电机组向电网输出的有功功率)。

同时, 假设发电机输出的无功功率全部由不可控整流桥消耗, 即有:

$$\begin{cases} P_r = P_g \\ Q_r = Q_g \end{cases} \quad (11)$$

式中, P_r 和 Q_r 分别为不可控直流桥输出的有功功率和消耗的无功功率。

由文献[22]提出的拟合方法, 可得 P_r 和 Q_r 之间的稳态特性:

$$Q_r = k_4 P_r^4 + k_3 P_r^3 + k_2 P_r^2 + k_1 P_r + k_0 \quad (12)$$

式中, 拟合系数 k_0 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 依次为 -0.6981 、 1.2829 、 -0.6506 、 0.3485 、 -0.0251 。

2 SP-EESWG 的控制策略

根据风速及相应控制策略的不同, SP-EESWG 的运行特性有所不同。当风速大于切入风速而小于额定风速时, 为了获得最大能量, 风机采用定桨距角控制(即固定桨距角为零), 此时发电机转速控制分为两个阶段: 当风速低于最佳风速时控制发电机的转速跟踪最佳转速以实现最大风能跟踪; 当风速高于最佳风速时, 控制机组以额定转速运行。因此, 发电机的转速为

$$\omega_e = \begin{cases} \omega_{opt} & V_{in} < V_w < V_m \\ 1.0 & V_m \leq V_w < V_r \end{cases} \quad (13)$$

式中: V_{in} 、 V_m 、 V_r 分别为风力机的切入风速、最佳风速、额定风速; ω_{opt} 为发电机的最佳转速, 其确定过程如下所述。

由于额定风速以下桨距角 β 固定为零, 式(3)可以简化为

$$C_p = \left(\frac{60.0416 V_w}{\omega_w R} - 4.6895 \right) e^{\left(0.735 - \frac{21 V_w}{\omega_w R} \right)} + \frac{0.0068 \omega_w R}{V_w} \quad (14)$$

由式(14)可见, 当风速一定时, C_p 只和风力机转速有关。由于最大风能跟踪的实质就是实现 C_p 的最大化, 因此某一风速下 C_p 的极值点对应的风力机转速即为风力机最佳转速, 即通过求解如下方程可得风力机最佳转速:

$$\frac{dC_p}{d\omega_w} = \frac{1260.8736 V_w^2 - 158.5211 V_w R \omega_w}{R^2 \omega_w^3} \cdot e^{\left(0.735 - \frac{21 V_w}{R \omega_w} \right)} + \frac{0.0068 R}{V_w} = 0 \quad (15)$$

同时, 由式(4)可知, 在稳态的时候有 $\omega_w = \omega_e$, 故式(15)求得的风力机最佳转速即为发电机的最佳转速 ω_{opt} 。

此外, 当风速大于额定风速而小于切出风速时, 机组在桨距角控制的作用下维持额定功率输出;

当风速超过切出风速或者低于切入风速时, 风电机组的输出功率均为零。

除上述最大风能跟踪控制之外, SP-EESWG 的控制策略还包括维持直流电容电压恒定的励磁控制和并网逆变器的控制, 控制器的具体结构及参数详见文献[22]。

3 SP-EESWG 的稳态模型

将式(1)~式(13)方程中的微分项置零, 并假设最大风能跟踪控制、桨距角控制、直流电容电压控制及并网逆变器控制的控制变量均为其目标值, 则可以导出考虑 SP-EESWG 各部分稳态特性及控制特性的稳态模型, 如式(16)所示。

$$\begin{cases} T_w = 0.5\rho AC_p V_w^3 / \omega_w \\ U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} \\ P_g = P \\ Q_g = k_4 P_g^4 + k_3 P_g^3 + k_2 P_g^2 + k_1 P_g + k_0 \\ \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} = \sqrt{u_{d2}^2 + u_{q2}^2} \\ u_{d1}i_{d1} + u_{q1}i_{q1} = u_{d2}i_{d2} + u_{q2}i_{q2} \end{cases} \quad (16)$$

式中, C_p 的表达式如式(14)所示, 其余各中间变量的表达式如式(17)所示。

$$\begin{cases} T_e = T_w \\ \omega_e = \omega_w = \begin{cases} \omega_{opt} & V_{in} < V_w < V_m \\ 1.0 & V_m \leq V_w < V_r \end{cases} \\ u_{q1} = \omega_e \psi_{d1} - r i_{q1} \\ u_{d2} = -\omega_e \psi_{q2} - r i_{d2} \\ u_{q2} = \omega_e \psi_{d2} - r i_{q2} \\ u_r = r_f i_f \\ \psi_{d1} = -x_{d1} i_{d1} - x_{d12} i_{d2} + x_{ad} i_f \\ \psi_{q1} = -x_{q1} i_{q1} - x_{q12} i_{q2} \\ \psi_{d2} = -x_{d2} i_{d2} - x_{d12} i_{d1} + x_{ad} i_f \\ \psi_{q2} = -x_{q2} i_{q2} - x_{q12} i_{q1} \\ \psi_f = x_f i_f - x_{ad} i_{d1} - x_{ad} i_{d2} \\ T_e = \psi_{d1} i_{q1} + \psi_{d2} i_{q2} - \psi_{q1} i_{d1} - \psi_{q2} i_{d2} \\ P_g = u_{d1} i_{d1} + u_{q1} i_{q1} + u_{d2} i_{d2} + u_{q2} i_{q2} \\ Q_g = u_{q1} i_{d1} - u_{d1} i_{q1} + u_{q2} i_{d2} - u_{d2} i_{q2} \end{cases} \quad (17)$$

可见, 式(16)所示的方程组含 6 个方程和 9 个变量(即 V_w 、 ω_w 、 U_d 、 i_{d1} 、 i_{d2} 、 i_{q1} 、 i_{q2} 、 i_f 、 P)。假设风速 V_w 已知, 则可由式(13)和式(15)确定 ω_w , 而 U_d 可由直流电容电压控制确定。设直流电容电压的控制目标为 1.0 p.u.(以直流电容额定电压为基准), 则 U_d 的稳态值为 1.0 p.u.。因此, 式(16)满足变量数

与方程数相等的基本条件。

此外, 由于网侧逆变器采用单位功率因数控制, SP-EESWG 输出的无功功率 $Q=0$ 。因此, SP-EESWG 的稳态模型为

$$\begin{cases} f(P, i_{d1}, i_{d2}, i_{q1}, i_{q2}, i_f) = 0 \\ Q = 0 \end{cases} \quad (18)$$

4 含 SP-EESWG 电网的潮流计算

电网的潮流方程为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases} \quad (19)$$

式中: i 、 j 分别表示节点号; P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的注入有功和无功; e_i 、 f_i 分别为电压的实部和虚部, G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵第 i 行、第 j 列元素的实部和虚部; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的负荷有功和无功; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的发电机有功和无功。

对于 SP-EESWG 接入节点, 由于 SP-EESWG 的并网有功和无功功率可以独立控制^[22], 根据控制方式的不同, 可以处理为 PQ 节点(恒功率控制)或 PV 节点(恒电压控制)^[17]。本文中, 由于 SP-EESWG 网侧逆变器通过 d 轴电压定向控制实现有功和无功的解耦控制, 以及采用单位功率因数控制^[22], 在潮流计算中可将 SP-EESWG 并网节点处理为 P 按最大风能跟踪控制策略变化、 Q 恒为零的 PQ 节点。在已知风速和机组详细参数的情况下, 通过求解式(18)所示的非线性方程组即可确定该节点的 P_{Gi} 和 Q_{Gi} 。

此外, 尽管 SP-EESWG 的潮流模型是一组采用 X_{ad} 可逆基值系统(以六相电机单套定子绕组额定容量为基准)的非线性标幺方程, 但由于 SP-EESWG 通过功率与电网方程接口, 因此进行全网潮流计算时, 只需要对 SP-EESWG 的输出功率进行基准值转换即可。

5 算例分析

5.1 算例一

以图 2 所示的单机无穷大系统模拟重庆武隆某并网风电场, 基于 Simulink 平台搭建 SP-EESWG 的仿真模型及其并网电路。图中, 风电机组选用重庆海装风电设备有限公司的 H52-850 型机组, 经 620 V/35 kV 和 35 kV/110 kV 两级升压接入 110 kV 地区电网, 机组及系统的仿真参数详见文献[22]。

从理论上讲, SP-EESWG 的稳态计算结果应该和图 3 所示系统在扰动后的稳态响应一致, 从而可以验证本文所提 SP-EESWG 稳态模型的正确性。

H52-850 型机组的切入风速、最佳风速、额定风速和切出风速分别为 3 m/s、11 m/s、12.2 m/s、20 m/s, 额定容量为 850 kW。假设初始风速为 8 m/s, $t=5$ s 时风速跃变至 11 m/s, Simulink 模型的动态响应如图 3 所示。

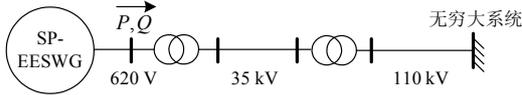


图 2 单机无穷大仿真系统

Fig. 2 Single-machine infinite bus system

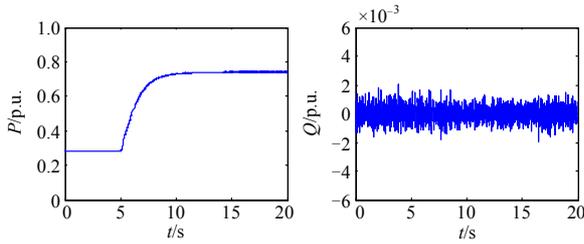


图 3 阶跃风速下 Simulink 模型的仿真结果

Fig. 3 Dynamic response under Simulink model

由图 3 可见, 随着风速的增大, SP-EESWG 输出的有功功率逐渐增加, 10 s 之后有功功率的变化趋于平稳; 由于采取单位功率因数控制, 风电机组输出的无功功率在零附近小幅波动。取不同的阶跃风速进行仿真, 以 $t=20$ s 的数值作为 Simulink 仿真结果的稳态值, 如表 1 所示(表中风速为跃变后的风速)。同表给出 SP-EESWG 的潮流计算结果。由表 1 可见, 各种风速下, 本文所提 SP-EESWG 潮流模型的结果均与 Simulink 仿真结果一致。以 Simulink 的结果为参考, 风速为 8 m/s 时, 有功功率出现最大偏差(1.58%), 由此可以验证本文模型的正确性。

表 1 不同风速下的计算结果对比

Table 1 Results under various wind speeds

风速/ (m/s)	有功 P/p.u.		无功 Q/p.u.	
	本文 模型	Simulink 模型	本文 模型	Simulink 模型
6	0.121 7	0.121 5	0	1.67×10^{-5}
8	0.288 5	0.284 0	0	3.55×10^{-5}
10	0.562 8	0.560 7	0	2.77×10^{-5}
11	0.748 8	0.742 0	0	3.13×10^{-5}
12.2	1.0	0.991 0	0	3.42×10^{-5}
14	1.0	1.0	0	4.38×10^{-5}

5.2 算例二

本算例将第 3 节所提稳态模型应用于接入 SP-EESWG 风电场的 IEEE-14 节点系统的潮流计算, 并分析现有简化模型对 SP-EESWG 潮流计算的适用性。

假设风电场通过变压器和 110 kV 线路接入 IEEE-14 节点系统^[23]的 14 节点(如图 4)。风电场由 40 台相同参数的 SP-EESWG 机组构成, 额定容量为 40×850 kW, 并网变压器和线路的总阻抗为 $12.6 + j24.96 \Omega$ 。

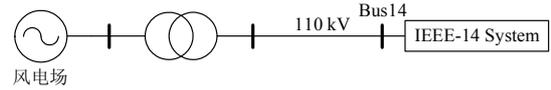


图 4 风电场接入 IEEE 14 系统图

Fig. 4 Wind farm connected to IEEE 14 system

假设风电机组仍然采用单位功率因数控制, 表 2 给出各种风速下, 基于现有简化模型(一次模型^[6], 二次模型^[8]和三次模型^[10])和本文模型计算得到的风电场输出的有功功率(MW)。其中, 风速为 8 m/s 时全网节点电压的计算结果如表 3 和表 4 所示(节点 1 为平衡节点, 节点 2、3、6、8 为 PV 节点)。表 2~表 4 中, “相对误差”表示以本文模型结果为参考, 各种简化模型相对于本文模型的偏差(%). 由表 2 可见, 当风速小于额定风速 12.2 m/s 时, 采用各种简化模型所得的风电场输出功率与本文模型的计算结果均有较大差异, 其中, 一次、二次和三次模型的最大误差约为 201%、41%和-40%; 风速越接近额定风速, 一次模型和三次模型的计算误差越小, 而二次模型的计算误差呈现出先增大后减小的特点; 在额定风速附近, 三次模型的误差为-0.73%, 与本文模型的计算结果比较一致。

由表 3、表 4 可见, 当风速为 8 m/s 时, 采用各种简化模型与本文模型所得的潮流计算结果也有一定差异, 与一次和二次模型比较, 三次模型的误差最小。由于各种模型风电场的输出无功均为零, 因此, 不同风电场模型对电压相角的影响更大, 三种简化模型的电压幅值的最大误差仅为 0.62%、0.25%和-0.05%, 而电压相角的最大误差分别达到-11.80%、-4.56%和 0.82%。同时, 各种模型的上述最大误差均出现在风电场接入节点(节点 14), 而与节点 14 电气距离较近的节点 9~13, 其结果的误差也普遍偏大, 表明风机模型对接入节点附近区域的潮流影响最大。

表 2 不同模型下风电场输出的有功功率比较
Table 2 Real powers of wind farm for various models

风速/(m/s)	本文 模型	一次模型		二次模型		三次模型	
		P/MW	相对误差/%	P/MW	相对误差/%	P/MW	相对误差/%
4	1.226 1	3.695 7	201.42	0.916 0	-25.29	0.730 2	-40.45
6	4.137 3	11.087 4	168.00	5.820 8	40.69	3.592 3	-13.17
8	9.809 0	18.479 0	88.39	13.124 0	33.80	9.218 2	-6.02
10	19.135 2	25.870 6	35.20	22.276 8	16.42	18.493 5	-3.35
12	32.568 6	33.262 2	2.13	33.279 2	2.18	32.330 3	-0.73
14	34.0	34.0	0	34.0	0	34.0	0

表 3 不同模型的节点电压幅值
Table 3 Voltage amplitudes for various models

节点号	本文 模型	一次模型		二次模型		三次模型	
		电压幅值/p.u.	相对误差/%	电压幅值/p.u.	相对误差/%	电压幅值/p.u.	相对误差/%
1	1.060 0	1.060 0	0	1.060 0	0	1.060 0	0
2	1.045 0	1.045 0	0	1.045 0	0	1.045 0	0
3	1.010 0	1.010 0	0	1.010 0	0	1.010 0	0
4	1.019 4	1.020 8	0.14	1.020 0	0.05	1.019 3	-0.01
5	1.021 2	1.022 5	0.13	1.021 7	0.05	1.021 1	-0.01
6	1.070 0	1.070 0	0	1.070 0	0	1.070 0	0
7	1.062 8	1.063 7	0.08	1.063 2	0.03	1.062 7	-0.006
8	1.090 0	1.090 0	0	1.090 0	0	1.090 0	0
9	1.057 5	1.058 4	0.09	1.057 9	0.04	1.057 4	-0.007
10	1.052 3	1.053 1	0.07	1.052 6	0.03	1.052 2	-0.006
11	1.057 6	1.058 0	0.04	1.057 8	0.02	1.057 6	-0.003
12	1.055 9	1.056 4	0.05	1.056 1	0.02	1.055 9	-0.004
13	1.052 6	1.054 3	0.16	1.053 3	0.06	1.052 5	-0.01
14	1.044 2	1.050 7	0.62	1.046 8	0.25	1.043 7	-0.05

表 4 不同模型的节点电压相角
Table 4 Voltage phases for various models

节点号	本文 模型	一次模型		二次模型		三次模型	
		电压相角/(°)	相对误差/%	电压相角/(°)	相对误差/%	电压相角/(°)	相对误差/%
1	0	0	0	0	0	0	0
2	-4.747 6	-4.547 3	-4.22	-4.669 9	-1.63	-4.761 5	0.29
3	-12.330 4	-11.994 4	-2.73	-12.200 2	-1.06	-12.353 8	0.19
4	-9.810 8	-9.381 2	-4.38	-9.644 6	-1.70	-9.840 6	0.30
5	-8.313 9	-7.921 1	-4.73	-8.161 8	-1.83	-8.341 2	0.33
6	-13.207 3	-12.346 3	-6.52	-12.873 4	-2.53	-13.267 2	0.45
7	-12.467 3	-11.703 9	-6.12	-12.171 8	-2.37	-12.520 2	0.42
8	-12.467 3	-11.703 9	-6.12	-12.171 8	-2.37	-12.520 2	0.42
9	-13.844 4	-12.908 6	-6.76	-13.482 2	-2.62	-13.909 3	0.47
10	-14.017 5	-13.094 9	-6.58	-13.660 3	-2.55	-14.081 5	0.46
11	-13.744 1	-12.852 2	-6.49	-13.398 6	-2.52	-13.806 1	0.45
12	-13.951 5	-12.994 4	-6.86	-13.580 6	-2.66	-14.018 0	0.48
13	-13.938 6	-12.897 2	-7.47	-13.535 5	-2.90	-14.018 0	0.52
14	-14.100 0	-12.436 5	-11.80	-13.457 3	-4.56	-14.215 0	0.82

6 结论

本文以六相电励磁同步风力发电机组各部分数学模型为基础,详细考虑风力机风能利用特性、整流-逆变电路的稳态特性,以及机组所采用的最大风能跟踪控制、直流电容电压控制和并网逆变器控制对稳态特性的影响,建立 SP-EESWG 的稳态模型,并将其应用于含 SP-EESWG 电网的潮流计算。

以重庆武隆某风电场选用的 850 kW 风电机组为原型,通过与单机无穷大系统的 Simulink 仿真结果进行对比,验证了本文所提稳态模型的正确性。以接入 SP-EESWG 风电场的 IEEE-14 节点系统为例,对本文模型和现有风电机组简化模型的潮流结果进行了对比分析。仿真结果表明:各种风速条件下,现有风电机组的简化模型与本文模型的结果均有差异,其中,一阶模型和二阶模型的误差较大,不宜用于 SP-EESWG 的稳态特性分析;而在额定风速附近,三阶模型的误差基本可以忽略。

本文模型需要 SP-EESWG 的详细参数,而简化模型只需要基本的风速和容量参数,因此,当缺乏数据而只需要分析 SP-EESWG 在额定风速附近的潮流状态时,可以选用三阶简化模型。

参考文献

- [1] SCHIFERL R F, ONG C M. Six Phase synchronous machine with AC and DC stator connections, part I: equivalent circuit representation and steady-state analysis [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(8): 2685-2693.
- [2] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 257-270.
ZHU Xingyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Reviews on power system stochastic load flow and its applications in safety evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 257-270.
- [3] 陈杰,陈家伟,龚春英. 变速风力发电系统统一功率控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 256-265.
CHEN Jie, CHEN Jiawei, GONG Chunying. Research on a unified MPPT controller for variable-speed wind turbines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 256-265.
- [4] 张元,郝丽丽,戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [5] 董博,许晓艳,马烁,等. 基于长过程动态仿真的风电接入对系统频率控制影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 57-64.
DONG Bo, XU Xiaoyan, MA Shuo, et al. Influence study of wind power on system frequency control based on long-term dynamic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 57-64.
- [6] 洪芦诚,石立宝,姚良忠,等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 116-122.
HONG Luchen, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Fuzzy modeling and solution of load flow incorporation uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122.
- [7] 杨欢,邹斌. 含相关性随机变量的概率最优潮流问题的蒙特卡罗模拟方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 110-115.
YANG Huan, ZOU Bin. A Monte Carlo simulation method for probabilistic optimal power flow with correlated stochastic variables[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 110-115.
- [8] KARKI R, THAPA S, BILLINTON R. A simplified risk-based method for short-term wind power commitment[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 498-505.
- [9] KAIGUI X, ZEFU J, WENYUAN L. Effect of wind speed on wind turbine power converter reliability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(1): 96-104.
- [10] 陈春,汪飒,黎灿兵,等. 含分布式风电的配电网预防性重构[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 172-177.
CHEN Chun, WANG Feng, LI Canbing, et al. Preventive reconfiguration of distribution networks with distributed wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 172-177.
- [11] HAN X Q, YING Q, PENG W, et al. Four-dimensional wind speed model for adequacy assessment of power systems with wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2978-2985.
- [12] SEGURA-HERAS I, ESCRIVÁ-ESCRIVÁ G, ALCÁZAR-ORTEGA M. Wind farm electrical power production model for load flow analysis[J]. Renewable Energy, 2011, 36(3): 1008-1013.
- [13] 申洪,王伟胜,戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 60-63.

- SHENG Hong, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Reactive power limit of variable-speed constant frequency wind turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 60-63.
- [14] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [15] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 36-39.
WU Yichun, DING Ming, ZHANG Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39.
- [16] 吴红斌. 基于风力机特性的风电机潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 22-25.
WU Hongbin. Power flow analysis of wind power generator based on wind turbine characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 22-25.
- [17] 李滨, 杜培, 韦化. 含同步风电机组的电力系统动态最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 8-15.
LI Bin, DU Pei, WEI Hua. Dynamic optimal power flow considering synchronous wind generator system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 8-15.
- [18] 李生虎, 华玉婷, 朱婷涵. 无刷双馈异步电机潮流建模和收敛性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 90-97.
LI Shenghu, HUA Yuting, ZHU Tinghan. Power flow modeling and convergence analysis to brushless doubly-fed induction machines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 90-97.
- [19] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 117-121.
LI Dongdong, CHEN Chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 117-121.
- [20] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [21] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [22] 易元睿. 六相电励磁同步风力发电机组的建模与控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
YI Yuanrui. Study on modeling and control of six-phase electric excitation synchronous wind generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [23] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-05-11

作者简介:

赵霞(1975-), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统稳定性方面的研究;

周桢钧(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事微电网仿真与控制研究; E-mail:zhouzhenjun1989@163.com

余淦绿(1991-), 女, 硕士研究生, 从事微电网仿真与控制研究。

(编辑 葛艳娜)