

# 异步风力发电机稳态模型研究

顾威, 李兴源, 魏巍

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**可靠、清洁的能源供应是现代社会发展与进步的保障, 面对日益严重的能源危机, 风能逐渐成为新的替代能源。风力发电与一般的能源发电有着很大的区别, 其最大的一个特点是风速有很大的随机性, 如果并网的风力发电机容量较大, 则将对电网有较大影响。因而需要对包含有风电场的电力系统进行潮流计算, 以分析风电场引起的电网电压和功率的变化。在此所研究的 PQ 模型是分析风电场的最基本也是最常用的模型。一般风力发电机的等值模型有三种: PQ 模型、RX 模型和简化 RX 模型。其中 PQ 模型又有不计及转差的 PQ 模型和计及转差的 PQ 模型这两种。在不要求较高精确度的情况下 PQ 模型实用性很强, 因此研究风力发电机的 PQ 模型有很大意义。

**关键词:**异步风力发电机; 稳态 PQ 模型; 潮流计算; VC++

**Abstract** The energy source supply which is credible and clean is the guarantee of development and advancement of modern society. Because of energy sources crisis, wind energy is becoming a new replaceable energy. The most obvious characteristic of wind power is that wind speed has the randomness. As a result, if the capacity of wind power is too large, it will have a great impact on the grid. So the power system flow should be calculated to analyze the change of voltage and power which is caused by the wind power. PQ model is the most used one to analyze wind power. Generally, wind power generators have three equivalence model: PQ model, RX model and simplified RX model. Among them, there are PQ model with slip and PQ model without slip. When the precision is not important, PQ model is very practical. So it has an important meaning to investigate PQ model.

**Key words:** asynchronous wind generator; steady-state PQ model; power flow calculation; VC++

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0020-05

25年前,世界上安装了第一台风力发电样机,自那以后,风能的开发走过了漫长的历程。二十多年来,风电技术的发展不断加快,风电场的规模不断扩大。今天,全球都面临着能源挑战,气候的变化、能源需求的日益增长、能源安全问题等得到了广泛的关注。风电能帮助人们应对这些问题,可以说风能是现代成熟的最具效率的能源技术之一。

风力发电技术的发展趋势是:①单机容量不断扩大,利用率逐渐提高;②机组桨叶增长,具有更大的捕捉风能的能力;③塔架高度上升;④变桨距调节方式迅速取代失速功率调节方式,变速恒频并网机组能随风速大小随意旋转;⑤海上风力发电的技术取得巨大进展。随着风电技术水平的不断提高,经济性也在逐步提高<sup>[1~5]</sup>。

## 1 异步风力发电机的模型

风电场接入电力系统后,将会影响局部电力系统的潮流分布和电压水平。由于风电场的处理随机变化,因此将造成线路功率和节点电压的波动。当风电场的容量较大时,应当分析风电场引起的节点电压变化,校验是否会出现线路功率和节点电压越限现象等。在确定风电场的并网方案时,需要对含风电场的电力系统进行潮流计算。目的在于防止风电场引起所接入系统出现线路功率越限或者节点电压越限;同时防止风电场中的风电机组因端电压过低或者过高而使电压保护装置动作,造成非正常停机,从而损失发电量<sup>[6~8]</sup>。

风电场的接入也会对系统的频率造成影响,但是现代风机一般是由风力机驱动交流发电机经变频装置与电网并联(见图1)。在这种系统中,由于交流发电机是通过整流-逆变装置与电网连接,发电机的频率与电网的频率是彼此独立的,因此通常不会发生因频率相差较大而导致网络频率严重下降或上升的问题。

**基金项目:**国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217901);  
国家科技支撑计划项目(2008BAA13B01)

用风场降解等值模型时,在潮流计算中将其等值为 PQ 节点或者 RX 节点是最常见的两种方式,也有等值成 PX 节点的情况。使用 PQ 节点模型时,节点的有功和无功功率均为定值,认为风电机组中电容器组的自动分组投切,可以使风电场的功率因数保持不变。根据风机的有功功率输出特性确定出有功功率,无功功率可相应得出。

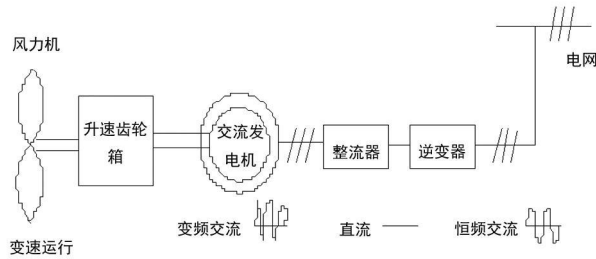


图 1 风力机驱动交流发电机经整流-逆变装置与电网连接图

异步电机作为发电机运行时,其功率传递关系与电动机相反。自然风吹动风轮机叶片,将风能转化为机械能,由此获得的机械功率扣除掉机械损耗后即传递到异步发电机转子上的机械功率  $P_{\Omega}$ 。在  $P_{\Omega}$  中扣除转子铜耗和定子铜耗,忽略铁心损耗,得到注入电网的电功率  $P_e$ 。

为简化计算,异步发电机采用  $\Gamma$  形近似等效电路。所忽略定子电阻  $R_s$  和铁心损耗  $P_{Fe}$ ,又由于  $X_m \gg X_s$  ( $X_m$  为励磁电抗,  $X_s$  为定子电抗),故可将励磁支路移至电路首端,得到简化的异步发电机  $\Gamma$  型等值电路,如图 2 所示。因此,注入电网的功率  $P_e$  就是电磁功率  $P_m$ ,即电阻  $R_r/s$  上的电功率。

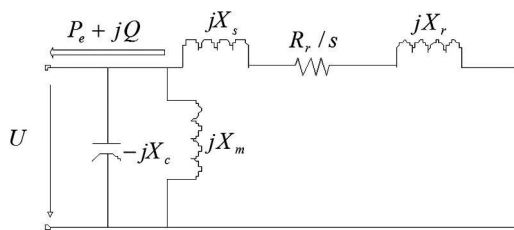


图 2 异步电机  $\Gamma$  型等值电路

### 1.1 计及转差的 PQ 模型

根据图 2 的电路关系可得:

$$P_e = \frac{-U^2 R_r / s}{(R_r / s)^2 + X_k^2} \quad (1)$$

式中,  $X_k = X_s + X_r$ 。经计算得到:

$$s = \frac{U^2 R_r - \sqrt{U^4 R_r^2 - 4 P_e^2 X_k^2}}{2 P_e X_k^2} \quad (2)$$

由等效电路可见,异步发电机的功率因数角  $\varphi$  与滑差  $s$  的关系为:

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{R_r^2 + X_k (X_k + X_m) s^2}{R_r X_m s} \right] \quad (3)$$

由此可知,异步发电机的无功功率  $Q_e$  与有功功率  $P_e$  之间的关系为:

$$Q_e = \frac{R_r^2 + X_k (X_k + X_m) s^2}{R_r X_m s} P_e \quad (4)$$

考虑到并联补偿电容,故有流入到电网中的风电场无功为  $Q = Q_c + Q_e$ ,其中  $Q_c = -U^2 / X_c$ 。

如果采用异步电机,进行潮流计算时必须考虑风电机组本身的特点:①异步发电机本身没有励磁装置,它要靠电网提供无功功率来建立磁场,因此它没有电压调节能力,不能像常规同步发电机那样把它视为电压幅值恒定的 PV 节点;②异步发电机在输出有功功率的同时还要从系统吸收一定的无功功率,其无功功率的大小与滑差  $s$  和节点电压  $U$  的大小有密切的关系,因此也不能简单地把它视为功率恒定的负荷节点,即 PQ 节点<sup>[9~15]</sup>。因此,在计算含有风电场的电力系统潮流时,必须考虑风电机组的数学模型,将其扩展到系统的功率方程中,进行联立求解,或者将系统功率方程和描述风电机组数学模型的方程进行交替迭代求解,计算的流程如下。

- (1) 给定风电场输出的有功功率  $P_e$ , 设定风电场节点的电压初值为  $U$ ;
- (2) 由  $P_e$  和  $U$  根据式 (2) 计算风电机组的滑差  $s$ ;
- (3) 由  $P_e$ 、 $U$  和  $s$  利用式 (4) 计算无功功率  $Q$ ;
- (4) 将风电场节点视为 PQ 节点求解整个系统的潮流,从而得到风电场节点电压的更新值  $U'$ ;
- (5) 如果  $|U' - U| > \epsilon$ , 则令  $U = 0.5(U + U')$ , 返回步骤 (2) 继续执行步骤 (2)~(4), 直到两次所得电压之差在规定误差范围之内,即  $|U' - U| < \epsilon$  ( $\epsilon$  为设定的精确度)。

电磁功率  $P_e$  与风速的三次方有关,下面将作详细说明。

### 1.2 不计及转差的 PQ 模型

风轮从风中吸收的功率可以用下面的公式表示:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (5)$$

$$A = \pi R^2$$

式中,  $P_e$  为风轮输出的功率;  $C_p$  为风轮的功率系数,

也称为风力机的利用系数;  $A$  为风轮扫掠面积;  $\rho$  为空气密度;  $v$  为风速;  $R$  为风轮半径。

其中  $C_p$  是叶尖速比  $\lambda$  ( $\lambda = \omega R / v$ ,  $\omega$  是风轮角速度,  $R$  是风轮半径) 和桨距角  $\theta_p$  的函数  $C_p(\theta_p, \lambda)$ 。

众所周知, 如果接近风力机的空气全部动能都被转动的风能叶片所吸收, 那么风轮后的空气就不动了, 然而空气不可能完全停止, 所以风力机的效率总是小于 1。

一般认为风电机组中电容器自动分组投切, 且补偿理想, 使风电场的功率因数不变, 有:

$$Q = P / \operatorname{tg} \varphi \quad (6)$$

$\varphi$  为并网风电场的功率因数角。而由于风力发电机使用的是异步发电机, 所以  $\varphi$  一般位于第四象限,  $\operatorname{tg} \varphi$  为负,  $P$  是发出的有功功率,  $Q$  是吸收的无功功率。  $P$  和  $Q$  方向相反。

在电力系统潮流计算中, 风电场的准确计算方法是根据异步电机的稳态等值电路, 计算出风电场在不同风速和系统电压水平下吸收的无功功率以及并联电容器组补偿的无功功率。异步电机稳态等值电路如图 3 所示。

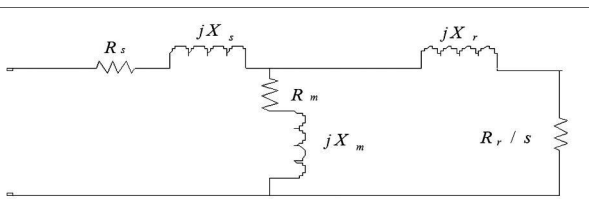


图 3 异步电机的稳态等值电路

其中  $R_s$ 、 $X_s$  为定子电阻和电抗,  $R_r$ 、 $X_r$  为转子电阻和漏抗,  $R_m$ 、 $X_m$  为励磁支路电阻和电抗。  $s$  为转差, 在发电机运行状态下为负值。

将无功功率 (消耗为正) 表示为:

$$Q = U^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + X \frac{U_2 + 2RP}{2(R^2 + X_k^2)} - X_k \frac{\sqrt{(U^2 + 2RP)^2 - 4P^2(R^2 + X_k^2)}}{2(R^2 + X_k^2)} \quad (7)$$

式中,  $U$  为机端电压,  $P$  是有功功率,  $X_k$  为定子和转子的漏抗之和,  $X_c$  为电容器组的电抗,  $X_m$  为异步电机的激磁电抗,  $R$  为定子和转子的电阻之和。

根据 MCLAURIN 多项式原则, 同时忽略异步电机的电阻, 可以将上式简化为:

$$Q \approx U^2 \frac{X_c - X_m}{X_c X_m} + \frac{X_k}{U^2} P_e^2 \quad (8)$$

由式 (5) 和式 (8) 可知, 该模型的有功功率只与风速有关, 其无功功率只与机端电压和有功功率有关。

其计算步骤如下:

(1) 给定风电场输出的有功功率  $P_e$ , 设定风电场节点的电压初值为  $U$ ;

(2) 由  $P_e$  和  $U$  根据式 (8) 计算风电机组的无功功率  $Q$ ;

(3) 将风电场节点视为 PQ 节点求解整个系统的潮流, 从而得到风电场节点电压的更新值  $U'$ ;

(4) 如果  $|U' - U| > \epsilon$ , 则令  $U = U'$ , 返回步骤 (2) 继续执行步骤 (2) ~ (3), 直到两次所得电压之差在规定误差范围之内, 即  $|U' - U| < \epsilon$ 。

## 2 异步风力发电机的潮流计算

VC++ 是一种功能比较强大的计算机高级程序设计语言, 由于程序设计较为方便简洁, 运算速度快, 因而适合于用来进行潮流计算。

首先是根据潮流图按 PQ 节点、PV 节点和平衡节点的顺序定下节点编号, 给出电压初值, 依照节点编号顺序形成一个导纳矩阵  $Y$ 。计算出风电场所在节点的有功功率值<sup>[16]</sup>。

其次是按极坐标形式下的牛顿迭代法计算出所有 PQ 节点和 PV 节点的  $\Delta P$  和 PQ 节点的  $\Delta Q$  的值, 接着求出 N、H、K、L 矩阵以形成雅克比矩阵。

再次, 利用求逆程序求出雅克比矩阵的逆矩阵, 得到雅克比矩阵的逆矩阵后可以求出每个节点的  $\Delta \theta$  和  $\Delta V$  的值, 进而得到除平衡节点以外的所有节点的电压幅值和相位。

最后, 比较两次电压值的差值, 若小于设定的精确度就停止迭代, 否则将一直迭代下去直到满足停止条件。

需要说明的是, 在潮流程序中所有使用的值都是标么值, 因而得到的电压幅值基本上都接近于 1, 处于额定值附近, 这说明系统的电压是稳定的, 不会因为风电场的接入而导致电压崩溃, 且系统是收敛的。

精确度则可以任意更改, 为得到较为精确的结果, 计算时的精确度选为 0.000 01, 即  $|U' - U| < 0.000 01$  时迭代结束。

计算所用到的电力系统图是一个 5 节点图, 如图 4 所示。

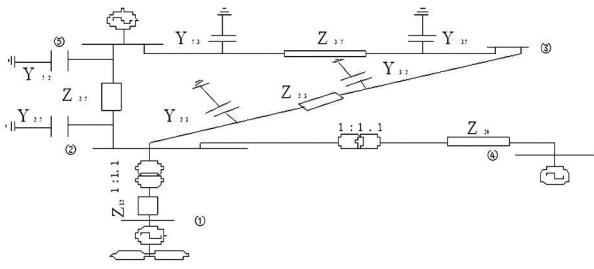


图 4 含风电场的系统图

该系统参数如表 1。

表 1 系统参数

名称	数值
Z12	$j0.20$
Z23	$0.10 + j0.40$
Z24	$j0.30$
Z25	$0.12 + j0.50$
Z35	$0.08 + j0.40$
Y23	$j0.01528$
Y32	$j0.01528$
Y25	$j0.01920$
Y52	$j0.01920$
Y35	$j0.01413$
Y53	$j0.01413$
P <sub>1</sub>	由风速决定
Q <sub>1</sub>	由电压决定
P <sub>2</sub>	0
Q <sub>2</sub>	0
P <sub>3</sub>	-0.55
Q <sub>3</sub>	-0.13
P <sub>4</sub>	0.5
V <sub>4</sub>	1.10
V <sub>5</sub>	1.05
θ <sub>5</sub>	0

单台风电机组电气参数见表 2。

表 2 单台风电机组电气参数

名称	数值
额定容量 /kW	600
转子电阻 R <sub>r</sub> /pu	0.00373
定子电阻 R <sub>s</sub> /pu	0.00306
励磁电阻 R <sub>m</sub> /pu	0.0284
额定电压 /kV	0.69
定子电抗 X <sub>s</sub> /pu	0.09985
转子电抗 X <sub>r</sub> /pu	0.10906
励磁电抗 X <sub>m</sub> /pu	3.54708
额定转差 s <sub>N</sub>	-0.004
功率因数	0.89
风能利用系数 C <sub>p</sub>	0.1217
扫掠面积 A/m <sup>2</sup>	2124
空气密度 ρ/(kg/m <sup>3</sup> )	1.06
额定风速 v/(m/s)	16

(计算所用的功率基准值为 100 MVA, 电压为额定电压值)

其余节点设定的电压初始值见表 3。

表 3 其余节点初始电压值

名称	数值
V <sub>1</sub>	1.0
θ <sub>1</sub>	0
V <sub>2</sub>	1.0
θ <sub>2</sub>	0
V <sub>3</sub>	1.0
θ <sub>3</sub>	0
θ <sub>4</sub>	0

计及转差的 PQ 模型迭代了 14 次后收敛。以下给出最终迭代的结果如表 4。

表 4 14 次最终迭代结果

迭代次数	节点编号	电压幅值	电压相位	有功功率	无功功率
14	1	0.9155	0.1063	0.0561	-0.0281
	2	1.0139	0.0930	0	0
	3	0.9780	-0.0599	-0.55	-0.13
	4	1.1	0.2156	0.5	-1.1012
	5	1.05	0	0.3581	4.5869

不计及转差的 PQ 模型迭代了 4 次后收敛。以下给出最终迭代的结果见表 5。

表 5 4 次最终迭代结果

迭代次数	节点编号	电压幅值	电压相位	有功功率	无功功率
4	1	0.9137	0.1066	0.0561	-0.0333
	2	1.0132	0.0933	0	0
	3	0.9776	-0.0599	-0.55	-0.13
	4	1.1	0.2159	0.5	-0.2419
	5	1.05	0	0.0876	0.9446

由于不计及转差的算法是直接新得到的电压幅值代入下一次迭代计算中, 即  $U=U'$  将代入迭代, 计及转差的算法是前一次和新得到的电压幅值相加后乘 0.5 之后的值代入下一次迭代计算中, 即  $U=0.5(U+U')$  代入迭代, 所以不计及转差的算法要比计及转差的算法快很多, 迭代次数要少。

如果将计及转差的算法代入电压也改成  $U=U'$ , 则同样的系统计及转差的 PQ 模型迭代次数也是 4 次, 最终结果如表 6。

表 6 最终结果

迭代次数	节点编号	电压幅值	电压相位	有功功率	无功功率
4	1	0.9155	0.1063	0.0561	-0.0281
	2	1.0139	0.0930	0	0
	3	0.9780	-0.0599	-0.55	-0.13
	4	1.1	0.2156	0.5	-0.2607
	5	1.05	0	0.0866	0.9297

结果表明, 计及转差的 PQ 模型和不计及转差的

PQ 模型结果都相差不大,在有风力发电机的节点 1, 计及转差的模型电压为 0.915 544, 而不计及转差的模型电压为 0.913 693, 两者都接近于 1。

风电场的加入对系统的影响不是很大,系统仍可以保持稳定,皆是收敛的。而两种 PQ 模型所得到的结果大体一致,只是计及转差的 PQ 模型算出的节点 1 的电压比不计及转差的 PQ 模型的节点 1 的电压要稍稍高一些,但都接近于 1,因而这两种 PQ 模型都是可行的。

### 3 结 论

风力发电机组是一种特殊的发电设备,它的并网运行对电网的电能质量以及安全稳定运行构成一定的威胁,主要表现为对电网频率和节点电压的影响,由于风力发电机一般是通过整流—逆变装置与电网连接,对频率影响不大,因此在风电场规模不断扩大的形势下,尤其要校验是否会出现线路功率和节点电压越限现象等,这就需要一种比较简单方便又不失精确的稳态模型,以对含风电场的电力系统进行潮流计算,得到准确的潮流计算结果,检验风电场的并入对电网电压的影响。因此,提出了风力发电机的 PQ 模型,而 PQ 模型又分为计及转差的 PQ 模型和不计及转差的 PQ 模型。在不强求太高精确度的工程计算中,PQ 模型是一个实用的选择。

在此提出了 PQ 模型的两种算法,用两个系统进行了两次验证,计算出的电压值都证明了两个 PQ 模型都可以得到较为准确的结果。

### 参考文献

- [1] 李俊峰. 风力 12 在中国 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] 张希良. 风能开发利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] 王承煦, 张源. 风力发电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [4] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术 (第二版) [M]. 机械工业出版社, 2006.
- [5] 刘家钰. 电站风机改造与可靠性分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] Andres E. Feijoo, Jose Cidras. Modeling of wind farm in the load flow analysis [J]. IEEE Transaction on Power System, 2000, 15(1): 110—115.
- [7] C. R. Fuerte-Esquivel, J. H. Tovar-Hernandez, G. Gutierrez-Alicaraz. Discussion of “Modeling of Wind Farms in the Load Flow Analysis” [J]. IEEE Transaction on Power System, 2001, 16(4): 951—952.
- [8] 徐娇, 李兴源. 异步风力发电机组的简化 RX 模型及其潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 22—25.
- [9] 吴俊玲, 周双喜, 孙建锋, 等. 并网风力发电场的最大注入功率分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(20): 28—32.
- [10] 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. 电网技术, 2003, 27(11): 60—63.
- [11] CHOWDHURY A. A. Reliability models for large wind farms in generation system planning // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting Vol 2, Jun 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA: 192621933.
- [12] LUBOSNY Z. Wind turbine operation in electric power system. New York, N Y, USA: Springer Verlag, 2003.
- [13] FEIJOO A E, CIDRAS J. Modeling of wind farm in the load flow analysis. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110—115.
- [14] ZHU Y, TOMSOVIC K. Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(3): 8222827.
- [15] 吴义纯. 含风电场的电力系统可靠性与规划问题的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [16] 邱晓燕, 刘天琪. 电力系统分析的计算机算法 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2004.

### 作者简介:

顾 威, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制及分布式发电。

李兴源, 男, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 主要研究方向: 电力系统稳定和控制。

魏 巍, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制及分布式发电。

(收稿日期: 2009—02—23)

# 欢迎订阅《四川电力技术》