

## 双馈式风机控制器参数整定的实用方法

杨睿茜, 陈红坤, 陶玉波, 缪芸, 胡倩, 王岭

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 随着应用场合的不同, 风电场模型参数需要相应改变。现在主流的风电场大多采用双馈式风机, 而双馈式风机模型中 PI 控制器参数修正问题少有文献谈及。针对此问题, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台下, 忽略风机启动的暂态过程, 转子侧、网侧变流器分别采用定子磁链定向、电网电压定向控制策略, 建立了转子侧、网侧变流器均采用 SPWM 调制的直接功率控制模型。给出了基于传递函数的控制器参数整定方法, 适用于双馈式风机的控制器参数的修正。模型详细参数采用 GE1.5 MW 双馈式风机组成的风电场模型参数。与 Matlab/Simulink 下仿真结果对比可知, 该整定方法取得了较理想的效果, 在两个仿真平台中输出参量具有较好的一致性。

**关键词:** 风电场模型; 控制器参数修正; PSCAD/EMTDC; SPWM 调制; 传递函数

### A practical method on doubly-fed induction generator controller parameter determination

YANG Ruixi, CHEN Hongkun, TAO Yubo, MIAO Yun, HU Qian, WANG Ling

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In different applications, wind farm model parameters need to modify simultaneously. Nowadays, doubly-fed induction generators are widely used in previous wind farm. Proportional integral controller parameters modification are rarely mentioned in the past paper. To solve the problem, a wind farm model is built in PSCAD/EMTDC simulation environment in this paper. In the model, transient process of doubly-fed induction generator is ignored. Stator flux orientation and grid voltage orientation strategy are used respectively in rotor-side converter and grid-side converter. Direct power control model with SPWM modulation are used in both rotor-side converter and grid-side converter. The controller parameter determination method is based on transfer function. The model can be a resolution on controller parameters modification problem. GE 1.5 MW doubly-fed induction generator parameters are used in the model. Comparing simulation results with that in Matlab/Simulink platform, the controller parameter determination method has got an ideal effect. The output parameters are of certain conformity.

This work is supported by National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (No. 2012CB215201).

**Key words:** wind farm model; model parameters modification; PSCAD/EMTDC; SPWM modulation; transfer function

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0063-07

## 0 引言

随着风电场在电网中渗透率的不断增大, 风电场接入对电力系统的影响也受到了广泛关注<sup>[1-4]</sup>。为了深入研究不同并网方式下大规模风电场的外特性, 通常需要建立可靠的风电场模型与实际工程应用的外部系统相连接。PSCAD/EMTDC 作为电力系统电磁暂态仿真专用软件, 在电磁暂态仿真中应用广泛。文献[5]在 PSCAD/EMTDC 中建立了南澳风

电场接入汕头电网的仿真模型, 研究了其在扰动和故障情况下的动态特性。文献[6]在 PSCAD/EMTDC 平台下建立了定速风电机组风电场的多机表征方法, 并在故障情况下对比得出了单机等值的精度不高问题。然而, 现有的基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式风电场模型大多直接与理想电源连接, 一旦将风电场与实际电力系统互联, 或者要研究已给定具体参数的风电场的外特性时, 风电场的参数就要重新调整。电气机械参数的调整较容易, 但对于双馈风电场中变流器的 PI 控制环节的参数的改变则少有文献提及, 通常通过试凑的办法得到, 对于复杂风电场模型的搭建适用性不强。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (2012CB215201)

为了提高模型的适用性,探究影响风电场输出有功、无功功率与风电场内部电气、机械参数之间的关系,对于研究重点不在风电场内部模型的项目中,减少建立风电场模型的时间,文中采用 GE1.5 MW 双馈式风机模型参数,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了详细的双馈风机风电场模型,并给出了 PI 控制器参数的整定方法,并与 Matlab/Simulink 中模型进行对比分析,对工程实践和含双馈式风电场移植到其他标准测试模型中具有重要意义。

## 1 双馈式风力发电机模型

双馈式风力发电机凭借其对于有功、无功的良好控制能力而广泛应用。模型主要包括风力机模型、发电机模型和变流器模型三部分。

### 1.1 风力机模型

风力机模型采用最佳风能捕捉控制和桨距角控制策略。此控制策略是基于双馈风力发电机运行区域确定的。双馈式风机一般的运行区域如图 1 所示,图中  $\omega_r$  表示风力机转速,  $P$  表示风力机输出的机械功率。

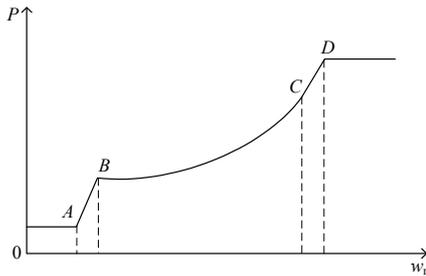


图 1 双馈式风机运行区域

Fig. 1 Running area of doubly-fed induction generator

最佳风能捕捉策略主要内容包括:当风力机转速低于 A 点转速时,风力机不输出功率;当风力机转速介于 AB 段与 CD 段之间,风机运行在线性区域;当运行区域在 BC 段之间,属于非线性区域段,风力机输出功率是风力机转速的三次方函数;当风力机转速高于 D 点转速时,风力机输出额定功率。由于风力机输出的机械功率是输入风速的三次方函数,在 D 点右侧,输出机械功率随着风速持续增长,而发电机可以接受的输入转矩是一定的,因而风力机桨距角控制开始起作用,桨距角控制采用 P 控制,将实际风力机转速相对于 D 点转速的偏差信号送入 P 控制器,输出信号为非零的桨距角,使得风能利用系数相应减小,风力机输出机械功率维持在额定功率。风力机数学模型及参数详见附录。

### 1.2 发电机模型

双馈式风机通常采用三相绕线式异步发电机,在 PSCAD/EMTDC 模型库中的绕线式异步电机可作为双馈式风机的发电机模型,模型有三个输入信号:转子转速、控制信号、转矩。转子转速信号如设定为常数,异步电机运行在恒定转速状态,一般在风机启动阶段采用恒转速运行。控制信号是用于进行转速、转矩两种控制方式的切换。输入转矩信号为正,异步电机运行在电动机状态,反之工作在发电机状态。

### 1.3 变流器模型

双馈风机变流器包括转子侧、网侧变流器。在模型中,很少有文献谈及此处的功率是指变流器内侧,即发电机出口处测量的功率,还是变流器外侧,即风机并网端测量的功率。由于双馈风机变流器模型的等效较复杂,严格来说,经过电压功率方程推导得到的功率通常指的是发电机出口处测量的功率,而非经过变流器环节后并网端的测量功率。本文中如没有特别强调,功率均指发电机出口处测量的功率。

转子侧变流器的控制目标包含:1)保持风机出口处有功在最佳风能捕捉控制的运行区域内。2)保持风机出口处无功为零。网侧变流器的控制目标包括:1)维持两变流器之间的直流环节直流电压恒定。2)保持风机出口处无功为零。

变流器模型的另一重点在于 PI 控制器部分的比例积分系数的确定<sup>[7]</sup>,本文转子侧变流器采用定子磁链定向的控制策略,且发电机定、转子侧均采用电动机惯例,将双馈风机运行的磁链、电压、功率方程进行由三相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换,如式(1)~式(3)(注:如非采用电动机惯例,方程式中某些项的符号也应改变)。

$$\begin{cases} \psi_s = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{sd} = 0 \\ u_{sq} = \omega_s \psi_s \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p \psi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p \psi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $p$  表示微分算子; 下标中  $s, r$  分别表示定子、转子端参数;  $d, q$  分别表示  $d$  轴、 $q$  轴分量; 电感  $L$  为经过三相到两相坐标变换后的电感值, 而非通用坐标系下的电感值;  $L_m$  为定转子互感;  $\psi_s$  表示磁链幅值; 由于定向在  $d$  轴, 因而  $d$  轴分量等于幅值,  $q$  轴分量为 0;  $\omega_s, \omega_r$  分别为同步角频率、转子角频率(单位: rad/s)。

## 2 控制器参数整定方法

双馈式风机的转子侧和网侧变流器中间通过直流环节连接。通常转子侧变流器为了实现快速响应, 采用电流滞环控制, 参考电流信号根据转速和无功间接控制<sup>[5]</sup>。这种控制方式简洁直观, 但控制器参数的确定只能采用凑试或选取经验值, 对于风电场模型参数变动的适用性不强。为了选择一种具有普适性的控制器参数整定方法, 本文依据转子侧变流器和网侧变流器的传递函数, 建立了两侧变流器均采用双环控制, SPWM 调制参考信号的控制器参数整定方法。

### 2.1 转子侧控制器参数整定

联立式(1)~式(3), 化简功率方程和转子侧电压方程如式(4)、式(5)。式(5)中,  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  为发电机的漏磁系数。观察式(4)、式(5), 可知双馈风力发电机出口处的有功、无功可分别由  $i_{rq}$ 、 $i_{rd}$  独立控制。将转子电压方程中同轴相电流合并, 异轴相作为前馈补偿相, 在频域内建立转子侧变流器的传递函数框图, 如图 2 所示。

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_{sq} i_{sq} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} i_{rq} \\ Q_s = \frac{3}{2} u_{sq} i_{sd} = \frac{3}{2} u_{sq} \left( \frac{u_{sq}}{\omega_s L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \left[ L_m \frac{\psi_s}{L_s} + \sigma L_r i_{rd} \right] \end{cases} \quad (5)$$

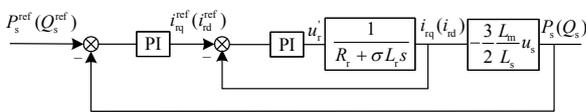


图 2 转子侧变流器传递函数框图

Fig. 2 Transfer function block diagram of rotor-side converter

传递函数结构图中, 令  $u'_r = R_r i_r + \sigma L_r \frac{di_r}{dt}$ , 先整

定电流内环的 PI 参数。在未加 PI 控制器前, 原始闭环传递函数的单位阶跃响应存在两个问题: 1) 系统存在稳态误差。2) 上升时间太短(对于双环控制系统, 一般内环上升时间为 0.002 s 左右, 外环上升时间为 0.02 s 左右)<sup>[8]</sup>。加入 PI 校正环节, 通常为了简化问题采用极点配置法进行比例、积分常数的确定。

对于形如  $\frac{k_p(\tau s + 1)}{\tau s}$  的控制器, 将原始开环传函化成

形如  $\frac{G_1}{1 + T_1 s}$  的形式, 积分常数  $\tau$  抵消原始开环传函

的时间常数。确定了积分常数后, 求取内环加入 PI 环后的闭环传函, 并整理成形如  $\frac{1}{1 + f(k_p)s}$  的形式,

根据典型一阶系统动态性能指标中, 上升时间  $t_r = 2.2T$ <sup>[9]</sup>。结合内环上升时间的参考值 0.002 s 并考虑 20% 的时间裕度, 即  $0.002 = 2.2 \cdot f(k_p) \cdot (1 + 20\%)$ , 可以得出比例常数。将校正后的内环传递函数作为外环的原始开环传函的一部分, 同样采用极点配置法, 与内环整定不同的是: 外环加入 PI 校正后, 闭环传函的阶跃响应理想上升时间为 0.02 s。且外环传函中有负常数环节, 整定时需注意相应 PI 控制器的比例积分常数也为负。将  $d, q$  轴电压方程中含转差角频率项作为前馈补偿相, 和电压项  $u'_r$  叠加生成转子端参考电压信号, 用 21 倍于同步角频率的 SPWM 波调制, 控制转子侧变流器电力电子开关的开断。

### 2.2 网侧控制器参数整定

网侧变流器模型基于定子侧电网电压定向, 电气结构图、频域下传递函数框图、 $dq$  坐标系下的电压方程分别如图 3、图 4、式(6)所示。式(6)中,  $V_d, V_q$  分别为图 3 中  $V_a, V_b, V_c$  经  $abc$  到  $dq$  变换后的  $dq$  轴分量,  $i_d, i_q, u_{d1}, u_{q1}$  同理。  $R, L$  为图 3 中线路电阻、电感值,  $\omega_s$  为同步角频率。类似于转子侧变流器的方法, 电流内环按照极点配置法整定成典型

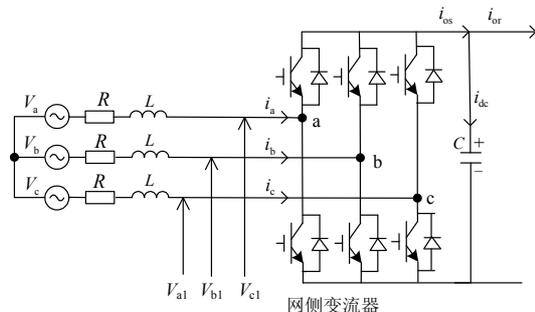


图 3 网侧变流器模型

Fig. 3 Model of grid-side converter



0.5 MW 的厂用电负荷, 再通过 0.575 kV/25 kV 的升压变压器升至 25 kV 输电线路, 总长为 30 km 的 25 kV 输电线路采用  $\pi$  型电路等效, 在线路末端通过 25 kV/120 kV 升压变压器与系统电源相连。风电场外部并网系统电气参数见表 1。

表 1 风电场外部系统电气参数

电气参数	数值	电气参数	数值
系统电源电压/kV	120	25 kV 线路正序电阻/( $\Omega$ /m)	1.15E-04
电源频率/Hz	60	25 kV 线路正序电抗/(H/m)	3.96E-04
120 kV 线路正序电阻/ $\Omega$	0.576	25 kV 线路正序充电电容/( $\Omega$ ·m)	234.1
120 kV 线路正序电抗/H	0.015 28	25 kV 线路零序电阻/( $\Omega$ /m)	4.13E-04
120 kV 线路零序电阻/ $\Omega$	1.728	25 kV 线路零序电抗/(H/m)	1.25E-03
120 kV 线路零序电抗/H	0.045 84	25 kV 线路零序充电电容/( $\Omega$ ·m)	529.46
120/25 kV 变压器容量/MVA	47	25 kV 线路长度/km	30
120/25 kV 变压器正序漏抗/p.u.	0.16	25/0.575 kV 变压器容量/MVA	12
120/25 kV 变压器空载损耗/p.u.	0.002	25/0.575 kV 变压器正序漏抗/p.u.	0.050 0
120/25 kV 变压器铜耗/p.u.	0.005 33	25/0.575 kV 变压器空载损耗/p.u.	0.002 0
		25/0.575 kV 变压器铜耗/p.u.	0.001 7
		风电场外部厂负荷/MW(星型)	0.50

### 3.2 仿真结果分析

风电场内部的详细电气机械参数见表 2。风机初始转差率设定为 0.2, 当  $t=0.5$  s 时, 发电机由转速控制切换到转矩控制, 发电机由输入转矩决定其出力。输入风速设定为: 初始风速为 8 m/s, 当  $t=5$  s 时, 风速阶跃变化到 14 m/s, 最大变化率限定  $1 \text{ s}^{-1}$ 。风电场有功、无功、直流环节电压加入 PI 校正控制后, 实测值(标记: 圈)与参考值(标记: 方形)的波形如图 7, 由图可以看出, 忽略启动时的暂态过程不计, 加入 PI 控制后, 有功、无功、直流母线电压实测值能很好地跟随参考值变化(由于有功功率表的

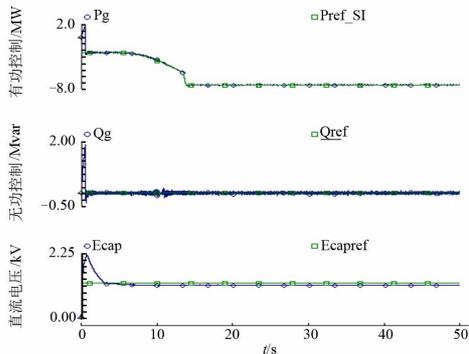


图 7 风电场输出功率、直流电压控制效果  
Fig. 7 Control effect results of wind farm output power and DC-link voltage

表 2 风电场详细参数

双馈式风力发电机参数			变流器参数		
定转子比	1	定子电阻/p.u.	0.007 06	网侧电阻/p.u.	0.002
惯性时间常数 H/s	5.04	绕线转子电阻/p.u.	0.005	网侧电感/p.u.	0.15
机械阻尼系数	0	励磁电感/p.u.	2.9	直流电容/ $\mu$ F	6 000
额定功率/MVA	10	定子漏感/p.u.	0.171	直流母线电压参考值/kV	1.2
额定线电压/kV	0.575	转子漏感/p.u.	0.156		
同步角频率/(rad/s)	376.99				

方向, 图 7 中以输入有功为正)。

为了验证模型的有效性, 将本模型结果与 Matlab/Simulink 模型对比, 图 8 中, 由上至下四个子图分别对应风电场出口处线电压、线电流( Simulink 中为有效值, PSCAD 中为瞬时值)、有功功率、无功功率。由图 8 可以看出, PSCAD 中和 Simulink 中模型具有较好的一致性, 在 PSCAD 模型中, 线电压恒定在额定值  $\pm 5\%$  的偏差内, 有功输出与线电流波形变化趋势吻合, 有功输出符合双馈风机最佳风能控制策略定义的运行区域, 当风速变

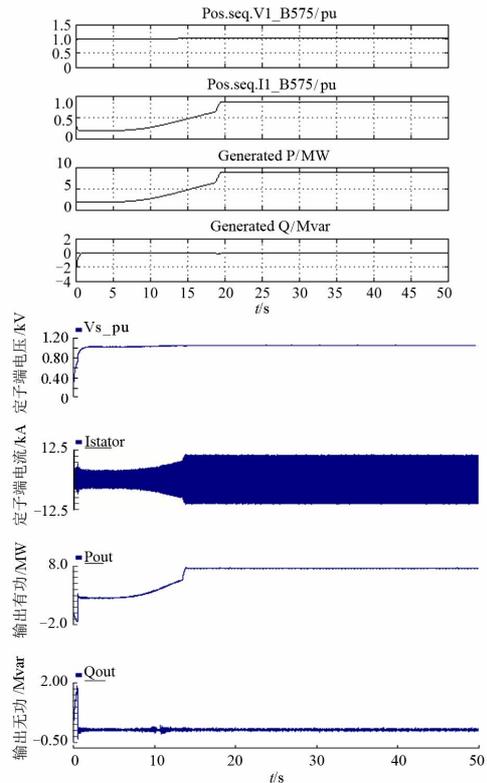


图 8 Simulink 与 PSCAD/EMTDC 中风电场输出量对比  
Fig. 8 Comparison of wind farm output parameters in Simulink and PSCAD/EMTDC platform

为 14 m/s 后, 风机出力大约为额定功率的 80%, 无功输出在 0 附近波动, 说明该控制策略取得了较理想的效果。

### 3.3 控制器的抗扰动性及整定方法的适应性

为了测试控制器在扰动情况下的控制效果, 在原来模型基础上, 在风电场并网变压器的高压侧 25 kV 母线处设置三相接地短路故障。故障发生在  $t=20$  s 时, 持续时间为 0.15 s。风电场在三相短路故障时, 输出功率、直流电压控制效果如图 9 所示。

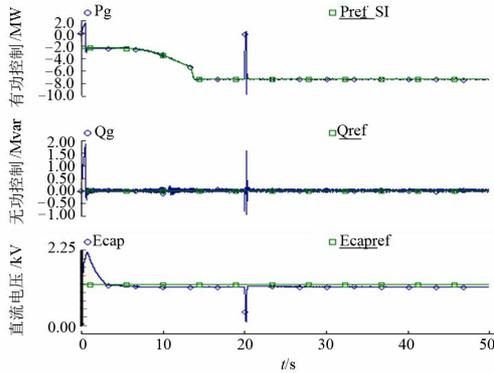


图 9 三相短路故障下输出功率、直流电压控制效果

Fig. 9 Control effect results of wind farm output power and DC-link voltage under the three-phase short circuit fault

本文提出的控制器参数整定方法的适应性取决于当风电场的电气机械参数变化后, 沿用该方法得到的控制器参数输入控制器能否获得良好的控制效果。由于功率内环的控制器参数与转子电阻、漏磁系数、转子漏感相关, 人为将转子电阻增大 30%, 转子漏感增大 40%, 并对控制器参数进行修正, 控制器的控制效果如图 10 所示。限于篇幅, 其他风电场参数变化后, 控制器参数的修正结果暂不赘述了。值得注意的是, 当风电场容量变化后, 修正控制器参数依然存在稳态误差时, 可通过增大控制器的上下限值来达到控制要求。

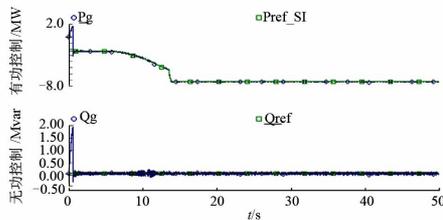


图 10 参数修正后输出功率控制效果

Fig. 10 Control effect results of wind farm output power when parameters corrected

## 4 结论与展望

在研究风电场与不同的外部系统之间的动态响应特性时, 大多数文献采用直接将整个风电场模块

移植到某个应用场合, 而面对风电场模型参数需要变更为与实际相结合的参数时, 往往需要手动调整参数, 电气机械参数的调整简单, 但 PI 控制器的参数修正如果没有统一的方法, 采用试凑的办法, 可能达不到良好的效果。

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下, 依据 GE 公司 1.5 MW 双馈风机模型参数, 搭建了基于最佳风能捕捉策略、桨距角控制并采用双 SPWM 变流器的双馈风电场模型, 给出了基于传递函数的 PI 参数整定方法。为风电场适应不同的应用场合参数的调整问题提供了一种解决方案, 具有现实意义。

然而该模型以忽略了风机启动时的电磁暂态过程为前提, 并没有深入研究变流器模型与风电场各参数之间的依存关系, 目前风电场动态等值问题作为一个被关注话题, 对于普通鼠笼式异步电机的等值已多有文献涉及, 但双馈式风力发电机由于其结构的特殊性, 转子侧含有电力电子器件, 而不能与普通异步电机的等值完全相同, 双馈式风机变流器的等值具有重要意义, 这也是今后研究工作的方向之一。

### 附录 风力机数学模型及参数

$$V_{\text{wind}}/V_c = V_{\text{pu}}, V_{\text{pu}}^3 = Pm_{\text{ec}}/p_{\text{u}}$$

$$\omega_r/\omega_c = \omega_{\text{pu}}, \frac{\omega_{\text{pu}}}{V_{\text{pu}}} = \lambda_{\text{pu}}, \lambda_{\text{pu}} \cdot \lambda_{\text{nom}} = \lambda$$

以图 1 中 C 运行点的参数为参考值, 右下角角标 pu 代表标么值, 右下角为 c 的表示 C 点对应的参数。

$V_{\text{wind}}$  为原始输入风速(单位: m/s);  $V_c$  为运行区域中 C 点对应的风速;  $Pm_{\text{ec}}/p_{\text{u}}$  为原始输入机械功率标么值;  $\omega_r$  为发电机转子转速(单位: rad/s);  $\omega_{\text{pu}}$  为发电机转速的标么值;  $\lambda_{\text{pu}}$  为叶尖速比标么值;  $\lambda_{\text{nom}}$  为叶尖速比基准值, 取 8.1。

$$\frac{1}{\lambda_{-i}} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$C_p = f(\lambda_{-i}, \beta, \lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_{-i}} - c_3 \cdot \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_{-i}}} + c_6 \cdot \lambda$$

$$\frac{1}{\lambda_{-i\_nom}} = \frac{1}{\lambda_{-nom}} - 0.035$$

$$k_{-nom} = - \frac{\left( \frac{c_2 \cdot c_5}{\lambda_{-i\_nom}} - c_4 \cdot c_5 - c_2 \right) \cdot e^{-\frac{c_5}{\lambda_{-i\_nom}}}}{\lambda_{-nom}^2}$$

$$c_1 = \frac{C_{p\_max}}{\left( \frac{c_2}{\lambda_{-i\_nom}} - c_4 \right) \cdot e^{-\frac{c_5}{\lambda_{-i\_nom}}} + k_{-nom} \cdot \lambda_{-nom}}$$

$$c_6 = k_{-nom} \cdot c_1$$

式中:  $\lambda$  为第一段公式中求取的叶尖速比有名值;  $\beta$  为桨距角(单位: 度);  $\lambda_{i\_nom}$ 、 $k_{nom}$  均为中间变量。  $c_2 \sim c_5$  为常数, 分别为: 116、0.4、5、21,  $c_1$ 、 $c_6$  由  $c_2 \sim c_5$  及上述中间变量确定。  $C_p$  为风能利用系数有名值, 是关于叶尖速比、桨距角的非线性函数。

$$\frac{C_p}{C_{p\_nom}} = C_{p\_pu}$$

$$P_{elec\_pu} = P_{mec\_pu} \cdot C_{p\_pu} \cdot K_{pu2pu}$$

$$K_{pu2pu} = \frac{P_{mec\_c}}{P_{elec}}$$

$$T_{m\_pu} = -1 \cdot \frac{P_{elec\_pu}}{\omega_{pu}}$$

式中:  $C_{p\_nom}$  为风能利用系数的基值, 取 0.48;  $P_{elec\_pu}$  为风力机输出的电磁功率(标么值);  $P_{mec\_c}$  为运行区域中 C 点对应的机械功率;  $P_{elec}$  为风电场的额定输出有功功率;  $T_{m\_pu}$  为输入发电机的转矩(乘以系数-1, 表征异步电机模型运行在发电机状态)。

### 参考文献

- [1] 谭谨, 王晓茹, 李龙源. 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 15-23.  
TAN Jin, WANG Xiaoru, LI Longyuan. A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 15-23.
- [2] 苏勋文, 米增强, 陈盈今, 等. 基于运行数据的风电机组建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 50-54.  
SU Xunwen, MI Zengqiang, CHEN Yingjin, et al. Method for modeling wind turbines based on operating data[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 50-54.
- [3] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.  
LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [4] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 58-65.  
HU Guowei, BIE Chaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 58-65.
- [5] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD/EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 62-66.  
LI Huanping, YANG Jinming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 62-66.
- [6] 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 representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [7] 曾志勇, 王清灵, 冯婧. 变速恒频双馈风力发电负载并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 33-37.  
ZENG Zhiyong, WANG Qingling, FENG Jing. Study on the load cutting-in control of the variable-speed constant-frequency (VSCF) wind-power generator[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 33-37.
- [8] 冯双磊, 赵海翔, 任普春, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.  
FENG Shuanglei, ZHAO Haixiang, REN Puchun, et al. PSCAD/EMTDC based simulation study on dynamic model of doubly-fed variable speed wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2007, 31(17): 30-35.
- [9] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] ANDREAS P. Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines[D]. Chalmers: Chalmers University of Technology, 2005.
- [11] PENA R, CLARE J C, ASHER G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1996, 143(3): 231-241.

收稿日期: 2014-04-09

作者简介:

杨睿茜(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电机组建模及动态等值。E-mail: yrx1006\_c2@163.com