考虑风电参与调频的区域电网频率控制

主要研究考虑风电参与电网调频下的区域电网频率控制。将传统区域模型中的频率输出作为风电惯性环节和一次调频环节的输入，建立了含风电的区域电网数学模型。在此模型基础上研究风电机组对电网频率恢复的贡献，并且通过粒子群算法优化比例积分控制器参数，改进比例积分控制，使其适应包含风电的区域电网。通过仿真对比风电未参与调频、区域一风电参与调频和两区域风电参与调频三种情况下系统频率和区域控制偏差的恢复情况。得出当电力系统发生扰动时，风电参与系统调频能够减少系统频率动态极值，对电力系统的稳定和安全具有积极意义。

任　凯　张江滨/西安理工大学水利水电学院
李　华/陕西省电力公司电力科学研究院

任　凯/硕士研究生

关键词/Keywords
风电·
区域电网·
频率控制·
粒子群算法·

0　引言

随着电力系统容量的增大、复杂程度的提升对区域电网频率控制的要求越发严格，风电的大规模并网大大降低了电力系统抵御崩溃的能力[1]。目前区域电网频率控制都仅仅建立在水、火电模型的基础上，没有考虑风电大规模并网对电网频率的影响。但是，电网中的水火电若不能对风电的接入作出响应，将导致较大的频率偏差，甚至威胁电网频率稳定[2]。近年来，对于风电机组参与系统调频的研究越来越多，使得风电机组能够响应系统频率变化，对系统的稳定性起到积极的作用，具备调频功能的风电场已经作为试点在实际中投入使用。文献[3]中作了相应理论分析，证明可以充分利用风电的调频容量，改善系统的调频能力。文献[4]提出将风电机组的惯性控制与一次调频相结合，实现了风电机组对系统频率的调节。

许多学者不仅在风电机组上作了研究，而且致力解决研究风电并入电力系统时产生的问题。文献[5]考虑风电并入电网后对电网频率的影响，得出随着风电渗透率的增加，发生扰动电网的频率偏差越大。文献[6]提出将风电输出当作负的负荷作为负荷模型，验证了含波动性风电的互联系统有无负荷频率控制对系统频率的影响，但是没有考虑风电的调频能力。文献[7]结合控制经验与模糊遗传算法改进负荷频率控制器中PI参数，减小了系统的超调和响应时间，但是没有考虑风机本身的功率调节能力。总结目前的研究现状，大多数研究确实已将风电的功率波动性考虑进区域电网，但是都没有建立频率控制环节，没有风电机组输入频率到输出功率的控制环，忽略了风机具有的调节能力。

本文将风电的调频控制应用到含风电的区域电网负荷频率控制中。首先，建立了考虑风电参与调频的区域电网频率控制模型，使风电参与系统的频率调节。不单单将风功率等效为负的负荷，而是通过频率控制环节让风电机组响应系统频率，当系统发生扰动时对系统提供功率支持，改善系统频率稳定性。然后，通过粒子群算法改进传统比例积分控制器参数，当发生负荷扰动时，使系统快速、稳定地恢复。

1　风电参与调频的区域电网模型

在传统水火电区域电网模型的基础上通过调频控制将风电引入电网，研究目前所面临的风电并网新形势下的区域电网频率控制。图1为风电参与调频下区

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

域电网频率控制流程图。

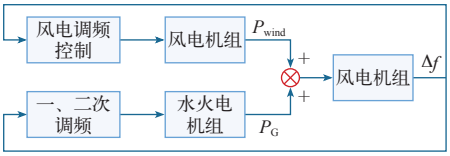

图1 风电参与调频的区域电网频率控制流程图

1.1 区域电网模型

电力系统具有高度非线性和时变性，与电压和功角特性相比，频率特性相对较慢，时间常数从秒级到分钟级不等，为分析负荷波动时频率综合控制策略，因此忽略系统电压及功角的变化，通常使用图2中区域电网模型部分所示的低阶线性模型[8]。

调速器模型为

$$G_g = \frac{1}{sT_g + 1} \tag{1}$$

式中，T_g为调速器时间常数。

原动机模型为

$$G_t = \frac{1}{sT_t + 1} \tag{2}$$

式中，T_t为原动机时间常数。

电力系统模型为

$$G_s = \frac{K_p}{sT_p + 1} \tag{3}$$

式中，K_p为电力系统增益；T_p为电力系统时间常数。

区域控制偏差

$$\mathrm{ACE} = \Delta P_{tie} + \beta \Delta f \tag{4}$$

式中，ACE为联络线功率偏差；β为频率偏差系数；Δf系统频率偏差。

图2中，R为一次调频增益系数；ΔP_d为负荷扰动；ΔP_w为风电功率支持。该模型用单机模型等效多机动态响应，将系统和负荷等效为一个阻尼常数，等效惯性系数等于所有发电机的惯性系数之和。区域之间通过高压输电线或者联络线互联，每一个单独区域的频率变化会影响与之互联区域的频率，区域i的频率偏差与联络线功率变化量的线性组合是ACE信号，ACE信号计算出来后将被分配给比例积分控制器，由控制器把控制信号传送给发电机组，系统的LFC必须控制区域间的交换功率及本区域的频率在指定范围内。

1.2 风电模型

（1）风速模型

风速模型由基本风、阵风、渐变风和随机风四部分组成，来描述风能的随机性和波动性。具体模型见文献[9]。

（2）风力机模型

风力机是风能利用装置，风力机的运行特性不仅影响机组的安全稳定运行，还决定了风力机

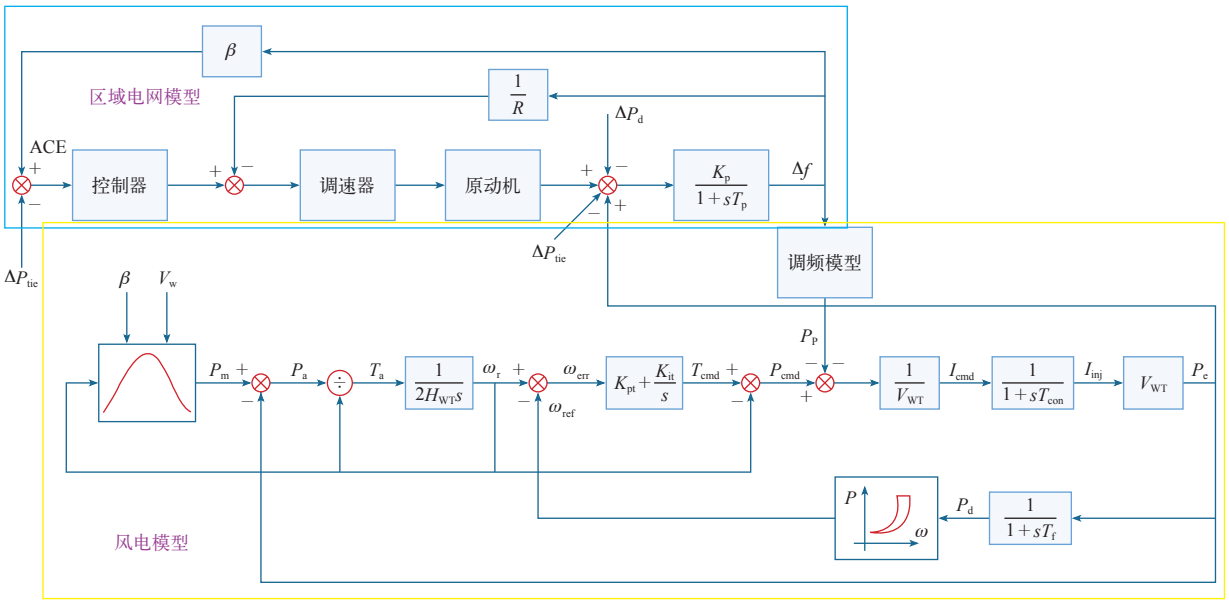

图2 风电机组调频控制系统模型

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的输出机械功率P_m，即

$$P_m = C_p P_w = \frac{1}{2}\rho S v^3 C_p \tag{5}$$

式中，ρ为空气密度，一般为1.25 kg/m^3；S为风机叶片迎风扫掠面积，m^3；v为空气进入迎风扫掠面之前的风速，m/s；C_p为风能利用系数，它是关于桨距角β和叶尖速比λ的高阶非线性函数[9]。

$$\begin{cases} C_p(\lambda,\beta) = c_1\left(\dfrac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right)e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \\ \dfrac{1}{\lambda_i} = \dfrac{1}{\lambda + c_7\beta} - \dfrac{c_8}{\beta^3 + 1} \end{cases} \tag{6}$$

式中，$c_2=116$；$c_1=0.517\,6$；$c_3=0.45$；$c_4=5$；$c_5=21$；$c_6=0.006\,8$；$c_7=0.08$；$c_8=0.035$；λ与叶片半径R、叶片转速ω_r和风速有关，即

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v} \tag{7}$$

（3）发电机机电暂态模型

$$\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} 2H_{WT} = P_a = P_m - P_e \tag{8}$$

式中，P_a为机械功率P_m与电磁功率P_e之差；H_{WT}为风电机组惯性时间常数。

（4）变流器模型

$$\begin{cases} P_{cmd} = T_{cmd}\omega_r \\ \dfrac{dP_e}{dt} = \dfrac{P_{cmd}}{T_{con}} - \dfrac{P_e}{T_{con}} \end{cases} \tag{9}$$

式中，P_{cmd}为功率参考值；T_{cmd}为转矩参考值。

（5）次优功率跟踪模型

风电机组在低于额定风速时，实行最大功率跟踪模式，最优转速和最大功率直接的关系可以通过函数关系表示；当风机采用功率次优跟踪模式时，预留功率备用用作调频容量，转速参考ω_{ref}与电磁功率测量值P_d的关系表示为

$$\omega_{ref} = -0.67P_d^2 + 1.42P_d + 0.51 \tag{10}$$

（6）转速控制模型

$$\begin{cases} \dfrac{d\varphi}{dt} = \omega_r - \omega_{ref} \\ T_{ref} = K_{iP}(\omega_r - \omega_{ref}) + K_{iI}\varphi \end{cases} \tag{11}$$

式中，K_{iP}为转速控制比例时间常数；K_{iI}为积分时常数。

（7）调频控制模型

如图3所示，在变流器输入侧的参考功率加入了调频控制器，当系统产生频率偏差Δf时，增加附加功率，包括惯性附加功率P_g和一次调频附加功率P_y，α为调频系数。

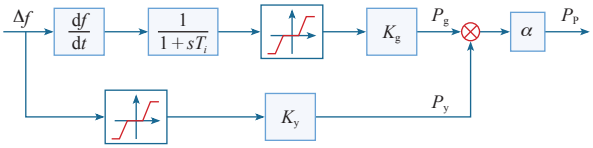

图3　风机调频模型

最大功率跟踪控制模块变换为次优控制模块，为速度控制器提供次优转子转速参考值ω_{ref}，经过PI控制环输出参考转矩T_{ref}。当系统频率发生扰动时，调频附加功率和电磁功率参考值P_{ref}一起构成总参考转矩，并将其送给变流器转子侧控制模型，经变流器的电流内环响应并最终改变输出电磁转矩。调频控制模型包含了惯性控制器和一次调频环。惯性控制在于调节电网频率导数的函数参考功率。当电网频率降低，电磁功率的设定值增大，会导致转子减速，这样将系统旋转质量块中储存的部分动能释放，参与动态频率调控。

2　粒子群算法优化设计

如图4所示，粒子群算法（PSO）与Simulink模型之间连接的桥梁是粒子（即PI控制器参数）和该粒子对应的适应值（即控制系统的性能指标）。优化过程如下：算法产生粒子群（可以是初始化粒子群，也可以是更新后的粒子群），将该粒子群中的粒子依次赋值给PI控制器的参数。然

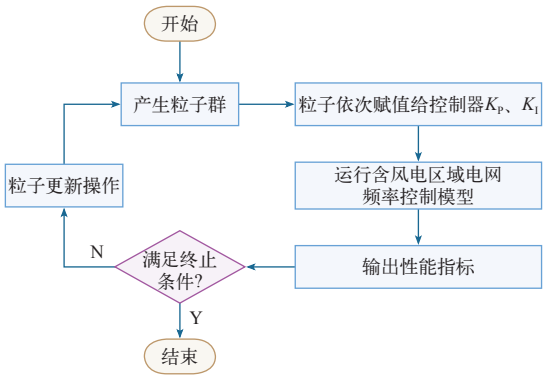

图4　粒子群算法优化设计框图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

后运行控制系统的Simulink模型，得到该组参数对应的性能指标，该性能指标传递到PSO中作为该粒子的适应值，最后判断是否可以退出算法。

粒子在搜索空间中的速度和位置根据如下公式确定，即

$$\begin{cases} v_{t+1} = wv_t + c_1 r_1 (P_t - x_t) + c_2 r_2 (G_t - x_t) \\ x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \end{cases} \quad (12)$$

式中，x为粒子的位置；v为粒子的速度；w为惯性因子；c_1、c_2为加速常数；r_1、r_2为[0,1]的随机数；P_t、G_t分别为粒子和整个粒子群目前的最优位置。

PSO算法流程如下。

1）根据频率差值设置适应值函数为fitness=$\int_0^\infty t|\Delta f|\mathrm{d}t$。

2）初始化粒子群，先随机得到粒子的位置和速度，并确定P_t、G_t。

3）对于单个粒子，将其适应值与该粒子所遍历的最优位置P_t的适应值相比较，如果更优，则将其作为当前P_t。

4）对于单个粒子，将其适应值与整个粒子群所遍历的最优位置G_t的适应值相比较，如果更优，则将其作为当前G_t。

5）通过程序更新粒子的速度和位置。

6）如果没有满足终止条件则返回步骤2）；否则，退出运行，得到最优解。

3 仿真分析

根据第一部分建立风电参与调频的典型两区域频率控制模型，利用Matlab/Simulink搭建两区域含风电的负荷频率控制仿真系统。本文主要研究负荷扰动下，风电对互联系统的频率支持，近似认为调频过程中风速变化为定值，设定为12 m/s。通过仿真分析有无风电调频对两区域互联电网负荷频率控制的影响，并采用PSO优化后的PI控制器参数K_P=0.095，K_I=0.075，研究系统发生ΔP_d=+0.01扰动时，在风电未参与调频，区域一风电参与调频和两区域风电参与调频三种情况下系统频率及区域控制偏差的变化情况。

图5、图6分别对比了区域一和区域二系统频率的变化。从仿真结果可以看出，当系统发生扰动时，风电对系统频率的恢复起到了积极的作用，区域一频率扰动的极值从原来的−0.026 7（pu）减小到了−0.017（pu）。区域二频率极值由−0.031（pu）减小到了−0.023 6（pu）。两区域风电都参与系统调频比单区域参与调频对频率极值的减小更有利，但两区域风电系统频率稳定时间较长。

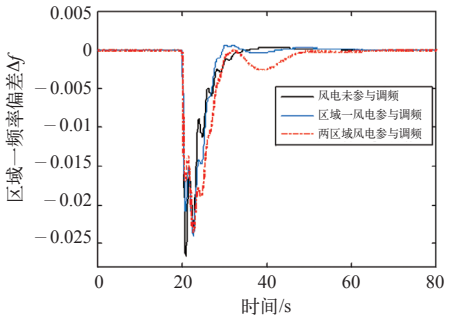

图5 风电调频参与调频下区域一频率偏差变化

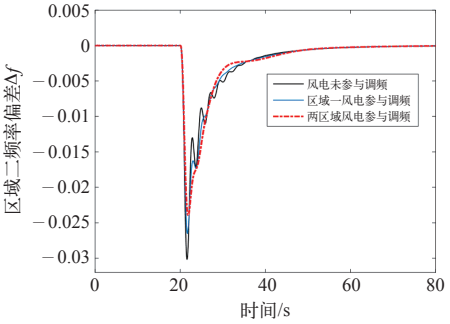

图6 风电参与调频下区域二频率偏差变化

区域电网主要采用定联络线偏差控制模式，当系统发生负荷扰动时，AGC通过ACE分配发电机组二次调频功率指令，非扰动区通过调频作用填补扰动区的功率缺额直到扰动消失，为了两个系统的安全稳定性，要尽可能地保证ACE变化值在允许的安全范围内。

如图7所示，风电参与系统调频下系统区域控制偏差ACE极值相比较无风电调频时更小，有利

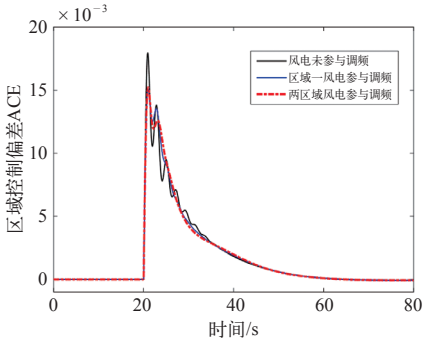

图7 风电参与调频下区域控制偏差变化

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于系统的稳定性。如表1所示发生负荷扰动后定量分析系统频率及ACE动态极值，可以看出，风电参与调频对频率极值有了明显的改善。

表1　风电是否参与调频频率极值比较

偏差(pu)风电 / 动态极值(pu)风电	风电未参与调频	区域一风电参与调频	两区域风电参与调频
区域1频率偏差Δf	−0.026 7	−0.021 8	−0.017 0
区域2频率偏差Δf	−0.031 0	−0.026 5	−0.023 6
区域控制偏差ACE	0.018 2	0.014 5	0.013 9

风电调频系数越大，风电响应系统频率，对系统的瞬时功率支持越大。如图8及表2所示可以看出，当系统发生扰动时，随着风电调频系数增大，系统频率动态极值不断减小，调频系数α为0.25～1.5，频率极值从−0.025 9逐渐减小到−0.019 6。因此可以看出，风电参与调频对系统频率恢复有积极的作用，但是调频系数增大到一定值时，会增大频率恢复稳态时间。

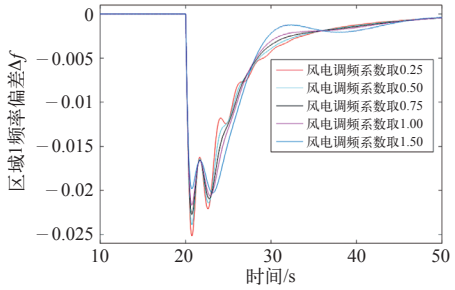

图8　风电调频系数对频率偏差的影响

表2　风电调频系数对频率极值的影响

风电调频系数α	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5
频率极值Δf(pu)	−0.025 9	−0.024 1	−0.022 5	−0.021	−0.019 6

4　结束语

研究了风电参与调频的区域电网的频率控制，增加风电频率输入环节，使风电机组在系统发生扰动时给电网提供功率支撑，比例积分控制器采用粒子群算法进行优化后，仿真得出以下结论。

1）风电参与系统调频下，当系统发生扰动时，对区域系统的频率恢复和区域控制偏差的稳定具有积极意义，可以减小频率和ACE动态极值，有利于系统的安全稳定性。

2）本文仿真结果显示调频系数α为0.25～1.5，频率极值从−0.025 9（pu）逐渐减小到−0.019 6（pu）。可见，风电调频系数越大，越有利于减小系统频率和ACE极值，但是到一定程度也会使系统不容易恢复稳定。

参考文献

[1] 薛禹胜，雷兴，薛峰，等．关于风电不确定性对电力系统影响的评述 [J]．中国电机工程学报，2014，34 (29)：5029-5040．

[2] 任杰，陈得治，宋云亭，等．大规模风电接入对系统频率特性的影响分析 [J]．电源技术，2016，40 (7)：1491-1494．

[3] 刘吉臻，姚琦，柳玉，等．风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究 [J]．中国电机工程学报，2017，37 (12)：3462-3469．

[4] 付媛，王毅，张祥宇，等．变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制 [J]．中国电机工程学报，2014，34 (27)：4706-4716．

[5] 周晖，付娅，韩盟，等．基于粒子群算法的含大规模风电互联系统的负荷频率控制 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (10)：1-7．

[6] 杨宇航，杨秀媛，张巧杰，等．模糊遗传算法在含风电负荷频率控制中的应用 [J]．电网技术，2014，38 (增刊1)：1-5．

[7] Xing P，Shi Q，Wang G，et al．Influence analysis of wind power generation on the characteristic of power system frequency [C]．Power Electronics and Motion Control Conference，IEEE，2016：1444-1447．

[8] 哈桑·贝朗尼．电力系统频率鲁棒控制 [M]．北京：机械工业出版社，2016．

[9] Luna A，Lima F K A，Santos D，et al．Simplified modeling of a DFIG for transient studies in wind power applications [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58 (1)：9-20．

（收稿日期：2018－01－11）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net