

励磁控制原理

一、 概念

风力发电机并网系统的主网部分发生故障时，通过调节图 1 中转子逆变器的控制策略来使风机发出无功，抬升并网点电压，发电机能安全度过故障，同时变流器继续维持在安全工作状态。

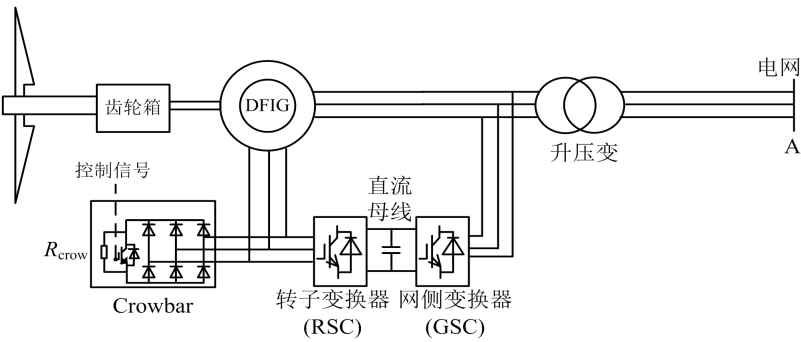


图 1 风机并网原理示意图

二、 控制原理

图 2 是转子侧变换器励磁控制框图，图 3 网侧变换器励磁控制框图。

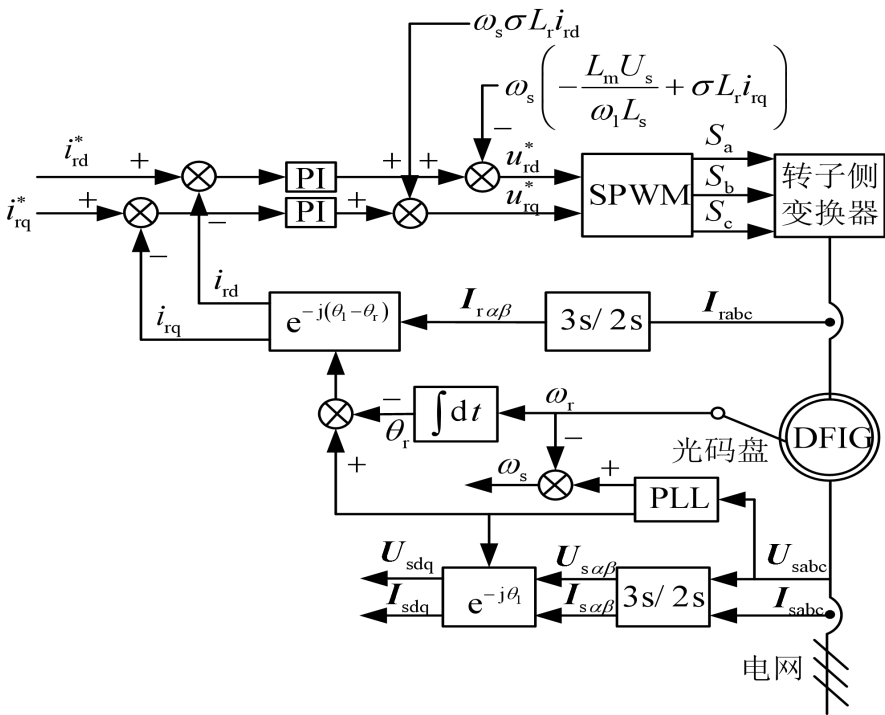


图 2 转子侧变换器励磁控制框图

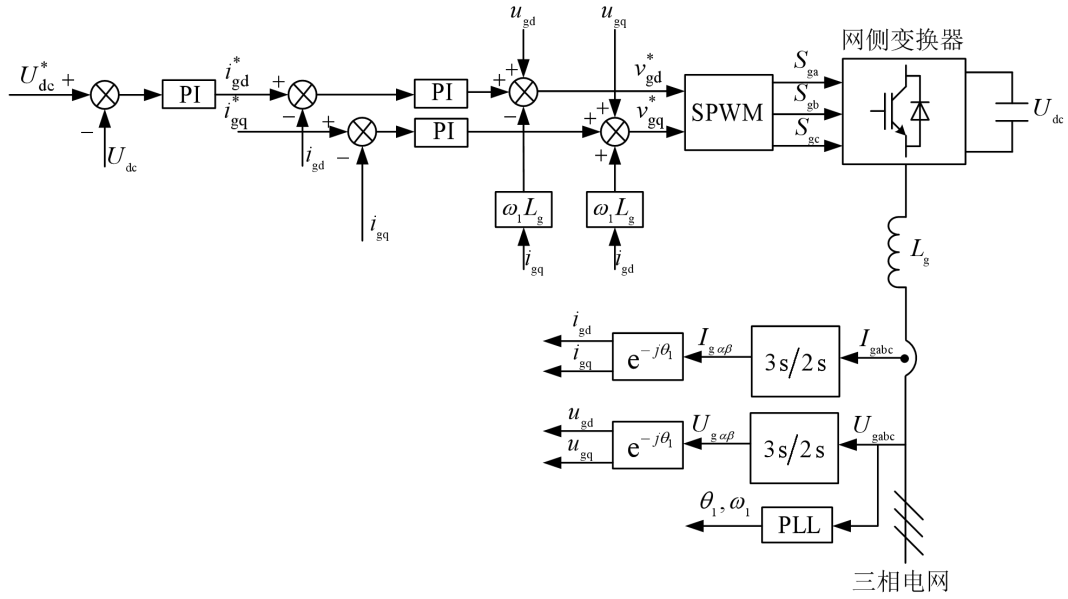


图 3 网侧变换器励磁控制框图

1) 风机转速与励磁电流

根据空气动力学特性，风力涡轮机从风能中吸收的功率为：

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad (1)$$

式中：V为风速（m/s）； ρ 为空气密度（ kg/m^3 ）；A为桨叶扫掠面积，等于 π 与桨叶半径R平方的乘积； C_p 为风能利用系数，是关于桨距角 θ 和叶尖速比 λ 的复函数，其表达式如下所示：

$$\begin{cases} C_{p\max(\lambda, \theta)} = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \\ \lambda = \frac{\omega_i R}{V} \end{cases} \quad (2)$$

式中： λ_i 是关于桨距角 θ 和叶尖速比 λ 的函数表达式，叶尖速比 λ 是风力机角速度 ω_i 、桨叶半径R乘积与风速V之比。

根据式（2）可以推导出风机组传动系统数学模型如下：

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3)$$

其中 ω_i 为风力机角速度，为风机机 T_m 机械转矩， T_e 为发电机的电磁转矩，J为

机组等效的转动惯量。

2) 并网电压、电流、有功功率、无功功率与故障点一些公式

两相静止坐标系下 DFIG 的 Park 变化公式为：

$$\begin{aligned}\vec{u}_s &= r_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} \\ \vec{u}_r &= R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} - j\omega_s \vec{\psi}_r\end{aligned}\quad (4)$$

式中： u_s 、 u_r 分别为电网侧电压矢量、转子侧电压矢量； i_s 、 i_r 分别为定子电流矢量、转子电流矢量； ψ_s 、 ψ_r 分别为定子磁链矢量、转子磁链矢量； ω_s 为转子侧角频率； R_s 、 R_r 分别为定子电阻、转子电阻。

定子磁链、转子磁链表达式为：

$$\begin{aligned}\vec{\psi}_s &= L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \\ \vec{\psi}_r &= L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s\end{aligned}\quad (5)$$

正常运行方式下发电机定子电压是一个以幅值 U_s 同步旋转的矢量，表达式为：

$$\vec{u}_s = U_s e^{j\omega_e t} \quad (6)$$

忽略定子电阻，依据式(1)可得定子磁链的计算表达式为：

$$\vec{\psi}_s = \frac{U_s}{j\omega_e} e^{j\omega_e t} = \vec{\psi}_{sf} e^{j\omega_e t} \quad (7)$$

由上式可得定子磁链是一个以同步速度旋转的空间矢量，正比于电网电压。

3) 电网电压跌落 DFIG 故障电流动态过程

a、电网电压完全跌落

当电网电压完全跌落时，电机将产生最严重的震荡过程，对风力发电系统影响危害最大，因此，将通过分析电网电压完全脱落时电机动态过程以作为电网电压部分脱落的参考。

假设 $t=t_0$ 时电网电压完全脱落，则 DFIG 定子电压矢量为：

$$\vec{u}_s = \begin{cases} U_s e^{j\omega_e t} & t < t_0 \\ 0 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (8)$$

故障前后定子磁链强制分量稳态值为：

$$\vec{\psi}_{sf} = \begin{cases} \frac{U_s}{j\omega_e} e^{j\omega_e t} & t < t_0 \\ 0 & t \geq t_0 \end{cases} \quad (9)$$

由于故障发生时刻磁链无法突变，因此故障后会存在一个暂态过程。假设发电机转子侧开路，分析故障后转子侧的动态特性。

转子电流为 0，转子电压为 u_{ro} ，根据式(1)、(4)可得定子磁通为：

$$\frac{d\vec{\psi}_s}{dt} = \vec{u}_s - \frac{R_s}{L_s} \vec{\psi}_s \quad (10)$$

对上式求解：

$$\vec{\psi}_s = \begin{cases} \vec{\psi}_{sf} = \frac{U_s}{j\omega_e} e^{j\omega_e(t-t_0)} & t < t_0 \\ \vec{\psi}_{sn} = \frac{U_s}{j\omega_e} e^{j\omega_e t_0} e^{-(t-t_0)R_s/L_s} = \vec{\psi}_0 e^{-t/\tau_s} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： U_s 、 ψ_0 分别为电网电压跌落前定子电压、磁链， τ_s 为定子衰减的时间常数， ψ_{sf} 为由系统稳态条件决定的强制磁链， ψ_{sn} 为随时间自由衰减的自由磁链。

式(9)经过求解后可得式(10)，经分析故障之后的定子磁链分为两部分：强制磁通分量（稳态）以及自由分量。强制磁通分量正比于电网电压，当电网电压完全跌落时为 0，自由分量与电网电压跌落程度无关，只与故障发生时风机运行状态相关联，是一个为保证定子磁链连续性的衰减分量。

依据式(4)、式(10)考虑转子开路，定子电流为：

$$\vec{i}_s = \begin{cases} \frac{\vec{\psi}_s(t < t_0)}{L_s} = \frac{U_s}{j\omega_e L_s} e^{j\omega_e t} \\ \frac{\vec{\psi}_s(t \geq t_0)}{L_s} = \frac{\vec{\psi}_0}{L_s} e^{-t/\tau_s} \end{cases} \quad (12)$$

b、电网电压部分跌落

设电压跌落前后电网电压幅值分别为 U_1 、 U_2 ，则故障后电压变化为：

$$\vec{u}_s = \begin{cases} U_s e^{j\omega_e t} = U_1 e^{j\omega_e t} & t < t_0 \\ U_2 e^{j\omega_e(t-t_0)} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (13)$$

电网电压跌落前后的定子磁链稳态分量正比于稳态电压：

$$\vec{\psi}_{sf} = \begin{cases} \frac{U_1}{j\omega_e} e^{j\omega_e t} & t < t_0 \\ \frac{U_2}{j\omega_e} e^{j\omega_e t} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (14)$$

由于磁链无法突变，因此会产生一个直流衰减的自由磁通分量。假设转子侧开路， $t_0=0$ ，则依据式(9)、式(13)可得转子磁链表达式为：

$$\vec{\psi}_s = \frac{U_1}{j\omega_e} e^{j\omega_e t} + \frac{U_1 - U_2}{j\omega_e} e^{-t/\tau_s} \quad (15)$$

4) 低电压穿越的公式

根据我国风电机组 LVRT 测试要求，机组在低电压穿越期间向电网提供的无功电流标么值可表示为：

$$I_Q = 1.5(0.9 - u_G) \quad 0.2\text{pu} \leq u_G \leq 0.9\text{pu} \quad (16)$$