

# 双馈风力发电机功率关系分析

肖 遥, 郭 巍, 庄 俊, 骆 皓

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

**摘 要:** 双馈风力发电机通过控制转子电压实现定子有功功率和无功功率控制, 由于其转差率变化范围较宽, 功率因数要求在容性与感性之间变化, 使得定、转子间功率关系比较复杂。转子的功率特性与变流器的容量设计直接相关。推导了双馈电机的等效电路图并基于等效电路计算了发电机定、转子功率分配关系。通过 Matlab 工具对双馈发电机各工况下的转子电流电压变化特性及发电机功率关系进行了仿真和验证。并通过一个实例提出了双馈变流器的主电路硬件设计方法。

**关键词:** 风力发电; 双馈电机; 有功功率; 无功功率

## 0 引言

双馈式风力发电机因为体积小, 配置的变流器容量一般不超过风机总容量的 1/3, 控制灵活, 在我国得以广泛应用, 据统计, 我国现投入运行的兆瓦级风力发电机组中, 采用双馈技术的机组占到 70% 左右。因为其通过转子励磁控制发电机的功率, 系统的功率流向与转差率  $s$  直接相关, 特别是当电网对风机有无功调节需求时, 电机内部功率关系比较复杂。本文详细分析了双馈电机定、转子间的功率关系, 并利用 Matlab 对双馈发电机各工况下的电气特性和功率关系进行了仿真和验证, 为设计变流器的硬件电路及功率控制策略提供了理论基础。

## 1 双馈发电机等效电路图

双馈发电机可看做一台转子施加励磁电压的绕线式交流异步感应电机, 因此其等效电路可以从异步电动机等效电路衍生而来。图 1 为采用电动机惯例的异步电动机等效电路图, 转子绕组短接, 端电压为 0。根据电机学原理可知: 要实现转子回路与定子回路的电路连接, 需要对转子回路进行绕组折算和频率折算, 这种折算的实质为用一与定子绕组匝数相同, 且与定子同相轴线重合的静止绕组替代实际匝数的转子旋转绕组。绕组折算比较简单在此不做讨论。以下假设转子绕组与定子绕组匝数相等, 仅讨论如何经过频率折算推导 DFIG 的等效电路。

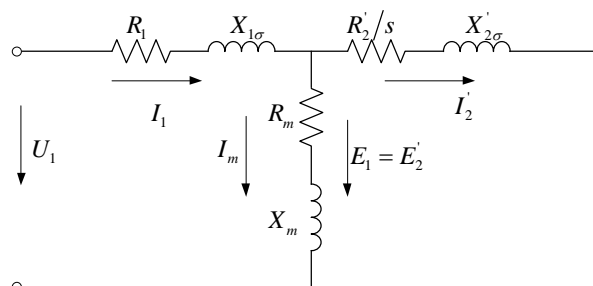


图 1 异步电机等效电路图

当  $s > 0$  时, DFIG 气隙磁场切割定子的方向与切割转子的方向一致, 转子感应电动势与定子感应电动势方向一致, 图 2 为  $s > 0$  时转子电路图。  $\mathcal{E}_{2s}$  为转子感应电压,  $X_{2\sigma s}$  为转子在  $s \times 50\text{Hz}$  下的漏抗,  $\mathcal{I}_{2s}$  为转子电流,  $\mathcal{U}_{2s}$  为转子端电压。转子电路存在如下关系:

$$\mathcal{E}_{2s} e^{j\omega_2 t} + \mathcal{I}_{2s} e^{j\omega_2 t} (R_2 + jX_{2\sigma s}) = \mathcal{U}_{2s} e^{j\omega_2 t} \quad (1)$$

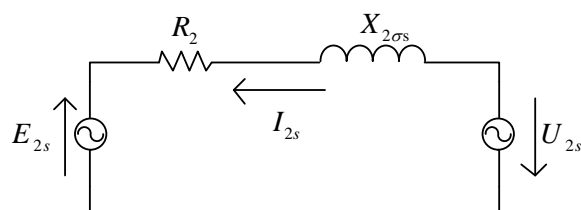


图 2 转子电路图

图 2 所示的电路频率  $\omega_2 = 2\pi \times s \times 50\text{Hz}$ , 要将该电路频率折算到 50Hz, 只要等式两边同时乘以

$$\frac{1}{s} e^{j(\omega_1 - \omega_2)t}, \quad \omega_1 = 2\pi \times 50\text{Hz}, \quad \text{则有:}$$

$$\mathcal{E}_2 e^{j\omega_1 t} + \mathcal{E}_2 e^{j\omega_1 t} (R_2/s + jX_{2s}) = \mathcal{U}_2 e^{j\omega_1 t} / s \quad (2)$$

亦可表示为:

$$\mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_2 (R_2/s + jX_{2s}) = \mathcal{U}_2 / s \quad (3)$$

$\mathcal{E}_2$  为  $s=1$  时的转子感应电压,  $X_{2s}$  为转子电路频率为 50Hz 时的漏感。

当  $s < 0$  时, 若定子电流不变, 则气隙磁场、定子磁动势和转子磁动势都与  $s > 0$  时相同, 只是相对转子绕组的旋转方向发生了改变。由于气隙磁场切割转子的方向与  $s > 0$  时相反, 则转子感应电动势反向, 而由于转子磁动势没有发生变化, 则转子电流幅值及相位都没有发生变化, 如图 3(d) 所示。同时, 因为气隙磁场相对转子的旋转方向发生了改变, 转子电路的相序由正序变为负序。

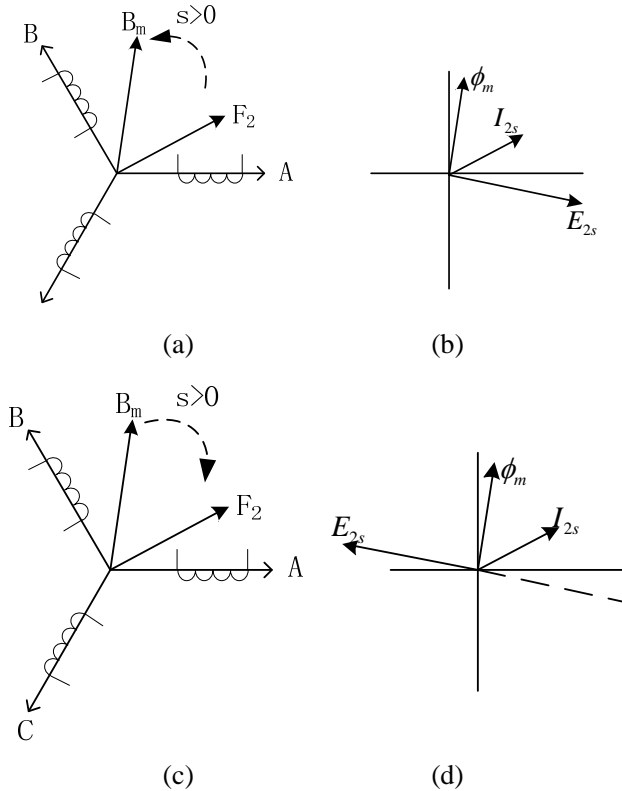


图 3 亚同步和超同步状态下转子电流电压的区别

$s < 0$  时, 转子电路仍符合式 (1) 的关系, 同理, 要将该电路频率折算到 50Hz, 只要等式两边同时乘

以  $\frac{1}{s} e^{j(\omega_1 + \omega_2)t}$ , 则有:

$$\mathcal{E}_2 e^{j\omega_1 t} + \mathcal{E}_2 e^{j\omega_1 t} (R_2/s - jX_{2s}) = \mathcal{U}_2 e^{j\omega_1 t} / s \quad (4)$$

亦可表示为:

$$\mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_2 (R_2/s - jX_{2s}) = \mathcal{U}_2 / s \quad (5)$$

结合式 (3) 和式 (5) 可以将转子折算公式统一为:

$$\mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_2 (R_2/s + j|s| X_{2s}/s) = \mathcal{U}_2 / s \quad (6)$$

根据时-空关系的统一性, 定子磁动势  $F_1$ 、转子磁动势  $F_2$  及励磁磁动势  $F_m$ , 定子电流  $\mathcal{I}_1$ 、转子电流  $\mathcal{I}_2$  及励磁电流  $\mathcal{I}_m$  始终存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} F_1 + F_m &= F_2 \\ \mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_m &= \mathcal{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

据以上推导可以得到双馈电机的等效电路图如图 4 所示。为了分析方便, 双馈电机定子采用发电机惯例, 转子采用电动机惯例。

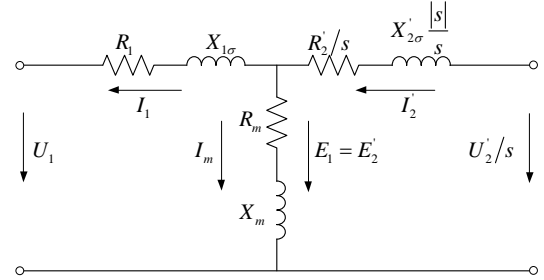


图 4 DFIG 等效电路图

通过等效电路图, 可以建立发电机定、转子的电压方程、励磁方程及磁动势方程如式 (8) 所示:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{U}_1 &= -\mathcal{I}_1 (R_1 + jX_{1s}) - \mathcal{E}_1 \\ \mathcal{U}_2 / s &= \mathcal{E}_2 (R_2/s + jX_{2s}|s|/s) - \mathcal{E}_2 \\ \mathcal{E}_1 &= \mathcal{E}_2 = -\mathcal{I}_m (R_m + jX_m) \\ \mathcal{I}_2 &= \mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_m \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中:  $s$  为转差率;  $\mathcal{U}_1$ 、 $\mathcal{I}_1$  分别为定子端电压与电流;  $R_1$ 、 $X_{1s}$  分别为定子电阻与漏抗;  $R_m$ 、 $X_m$  分别为励磁电阻与互抗;  $\mathcal{E}_1$ 、 $\mathcal{E}_2$  分别为定、转子感应电动势;  $R_2$ 、 $X_{2s}$  分别为转子电阻与漏抗;  $\mathcal{E}_2$ 、 $\mathcal{U}_2$  分别为转子电流与端电压。式中转子侧各量均已折算到定子侧。需要注意的是: 虽然经过频率折算后转子电路系统的频率为 50Hz, 但实际转子电路的频率为  $s \times 50\text{Hz}$ 。定、转子回路在电路上没有直接的联系, 两者通过磁场耦合产生相互影响。

图 5 显示了当定子功率因数为 1,  $s > 0$  时双馈发电机各量的相量关系。其中  $\mathcal{U}_{z1}$  为定子阻抗压降,  $\mathcal{U}_{z2}$  为转子阻抗压降,  $\phi_m$  为气隙主磁通。



较大，建立磁场所消耗的无功功率及定转子漏感无功功率不能忽略，这些因素导致双馈发电机无功功率关系比较复杂。定子无功功率性质与转差率共有四种组合，下面来定性分析转子无功功率与定子无功功率的符号关系。

(1)  $Q_1 > 0, s > 0$ ：从式 (16) 可知等式中各无功分量均大于 0，所以  $Q_2 > 0$ 。

从无功功率守恒的角度可以理解为：由于电网吸收感性无功功率，而励磁感抗、定转子漏感也都吸收感性无功功率，根据无功功率守恒，则折算后的转子电路应发送感性无功功率，即  $Q_2' > 0$ 。由于  $s > 0$ ，则实际转子无功功率  $Q_2 = s \times Q_2' > 0$ ，即转子从变流器吸收感性无功。

(2)  $Q_1 > 0, s < 0$ ：从无功功率守恒规则同理可得  $Q_2' > 0$ ，由于  $s < 0$ ，则实际转子无功功率  $Q_2 = s \times Q_2' < 0$ ，即转子向变流器发送感性无功。

(3)  $Q_1 < 0, s > 0$ ：如图 7 所示， $\dot{I}_1$  为发电机定子电流，其幅值恒定，通过改变  $\dot{I}_1$  的相位来调节定子无功功率。由于  $\dot{I}_1$  幅值为定值，则  $\dot{U}_{Z1}$  幅值恒定， $\dot{U}_{Z1}$  端点轨迹为以  $O'$  为圆心的圆，当  $Q_1 > 0$  时， $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ， $-\dot{E}_1$  端点与  $\dot{U}_{Z1}$  重合。当  $\theta$  如图 7(a) 所示时， $\dot{U}_{Z2}/s$  滞后  $\dot{E}_1$ ，折算后的转子无功功率  $Q_2' > 0$ ，当  $\theta$  如图 7(b) 所示时， $\dot{U}_{Z2}/s$  超前  $\dot{E}_1$ ，折算后的转子无功功率  $Q_2' < 0$ 。从以上分析可看出：当  $Q_1 < 0$  时，随着  $Q_1$  数值的增大，当  $Q_1$  小于某一特定值  $Q_1^*$  时， $Q_2'$  的性质发生了改变。由于  $s > 0$ ，转子无功功率由  $Q_2 > 0$  变为  $Q_2 < 0$ 。

这个过程可以这样理解：由于电机内部的定、转子漏感及励磁回路的无功均消耗感性无功功率，当定子从电网吸收的无功功率不足以平衡内部无功消耗时，转子侧仍需要从变流器吸收无功来使无功功率达到平衡；当定子从电网吸收更多的无功时，不仅能满足电机内部无功消耗，仍有无功功率可以通过转子侧向变流器发送。

(4)  $Q_1 < 0, s < 0$ ：该过程与 (3) 相似，只是由于  $s < 0$ ，随着  $Q_1$  数值的增大，转子无功功率由  $Q_2 < 0$  变为  $Q_2 > 0$ 。

综上，可以总结转子无功功率性质有如下几种情况：①当  $Q_1 > 0, s > 0$  时， $Q_2 > 0$ ；②当  $Q_1 > 0, s < 0$  时， $Q_2 < 0$ ；③当  $Q_1 < 0$  且  $Q_1 > Q_1^*$ ， $s > 0$  时， $Q_2 > 0$ ；④当  $Q_1 < 0$  且  $Q_1 > Q_1^*$ ， $s < 0$  时， $Q_2 < 0$ ；⑤当  $Q_1 < 0$  且  $Q_1 < Q_1^*$ ， $s > 0$  时， $Q_2 < 0$ ；⑥当  $Q_1 < 0$  且  $Q_1 < Q_1^*$ ， $s < 0$

时， $Q_2 > 0$ 。其中  $Q_1^*$  为某一特定功率值，它与电机本身的参数及定子有功功率（或电流）有关。

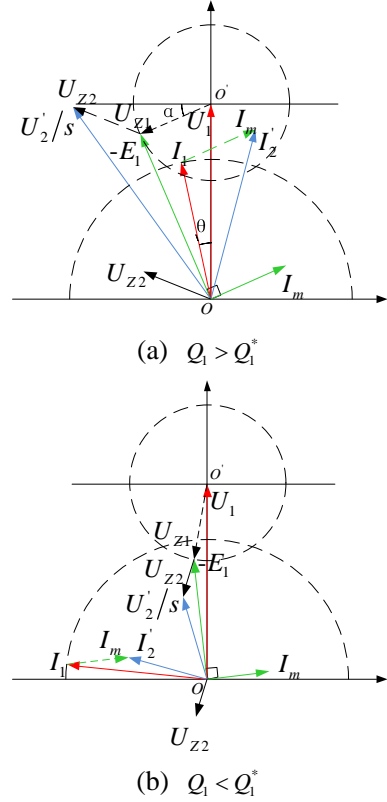


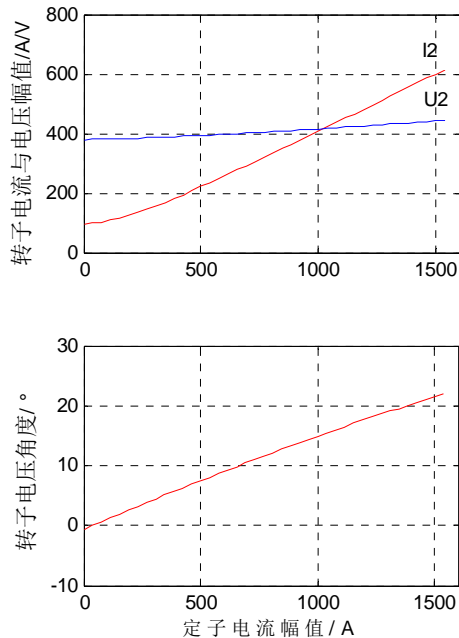
图 7 定子无功功率  $Q_1 < 0, s > 0$  时转子无功变化情况

## 4 仿真计算

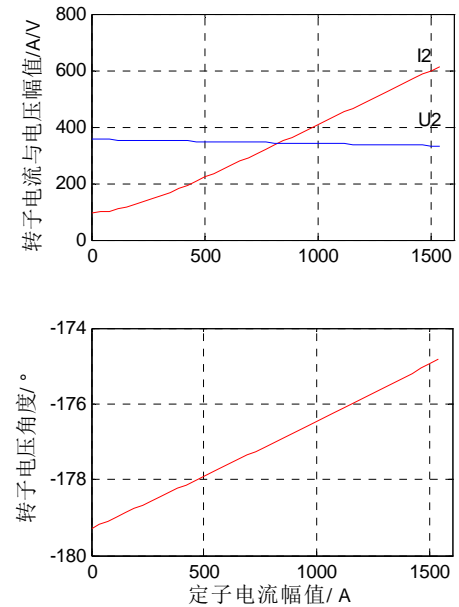
当获知实际电机参数值时可以利用 Matlab 等工具定量计算 DFIG 的定转子功率值。以下采用某公司 2MW 双馈发电机参数值，并利用 Matlab 对上述双馈发电机的功率关系进行仿真研究。具体参数为：电机额定功率 2150kW，2 对极，电网额定电压 690V，频率 50Hz，功率因数调节范围：容性 0.9~感性 0.9，额定转速 1755rpm，转速范围 1000rpm~2000rpm。开路电压 1835V(依此可计算定转子变比为  $690V/1835V=0.376$ )，转子额定电流 614A。 $R_1=0.00598\Omega$ ， $X_{1\sigma}=0.12\Omega$ ， $R_2'=0.00675\Omega$ ， $X_{2\sigma}'=0.0849\Omega$ ， $R_m=0.0686\Omega$ ， $X_m=2.67\Omega$ 。

图 8(a) 为定子功率因数为 1， $s=0.2$  工况下转子电流与电压随着定子电流增加的变化情况。图 8(b) 为定子功率因数为 1， $s=-0.2$  工况下转子电流与电压随着定子电流增加的变化情况。从图中可以看出：随着定子电流由 0 增加至额定值，转子电流由约 100A 增加至约 610A。转子电流初始的 100A 主要为电机励磁电流。且计算的转子额定电流 610A 与

电机铭牌值（614A）一致。同时可以看出：转子电流在电网电压一定的情况下与转差率无关，仅与定子电流有关，而转子电压与转差率有关。



(a)  $s=0.2$



(b)  $s=-0.2$

图 8 转子电流电压与定子电流的关系

图 9 为定子达到额定有功功率 1838kW， $s=0.2$ ，定子功率因数  $\lambda=0.8cap \sim 0.8ind$  变化时，定、转子有功功率和无功功率的变换情况。从图中可以看出：转子有功功率几乎保持不变，但无功电流的增加会增大发电机内部损耗，转子有功功率略有波动；转

子无功功率随着定子无功功率的减小而减小，当  $Q_1$  进一步减小时， $Q_2$  由正转负。

图 10 为定子达到额定有功功率 1838kW， $s=-0.2$ ，定子功率因数  $\lambda=0.8cap \sim 0.8ind$  变化时，定、转子有功功率和无功功率的变换情况。相比  $s=0.2$ ，转子有功功率变为负值，而无功功率由负转正。

从仿真计算结果来看，定转子功率关系符合第 3 节的分析结论。

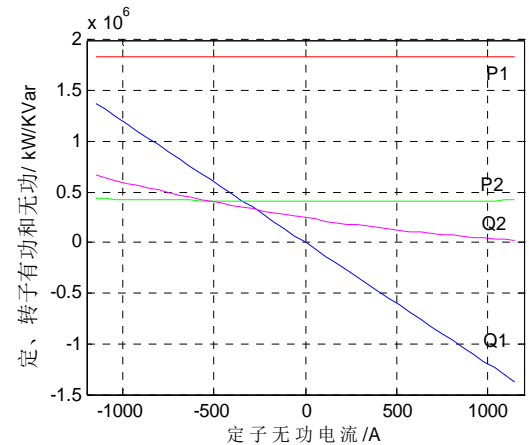


图 9  $s>0$  转子功率随定子无功的变化关系

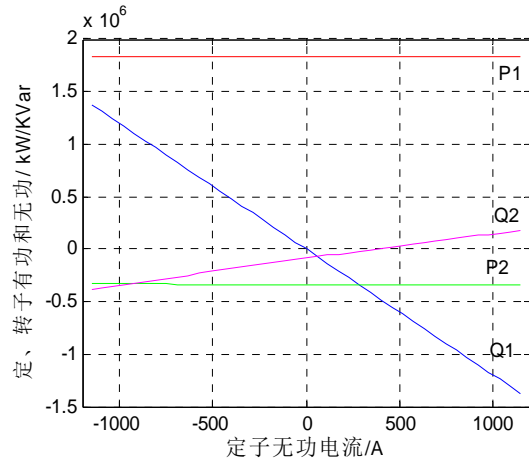


图 10  $s<0$  转子功率随定子无功的变化关系

图 11 为上述电机所匹配的 2.0MW 双馈变流器在 1800rpm 运行时实测定、转子电流电压波形，其中转子电压为示波器滤波功能所提取的基波电压。从图中可以看出：定子电路频率为 50Hz，而转子电路频率为 10Hz。定子功率因数为 1，而转子功率包含无功分量，主要为建立气隙磁场所消耗的无功功率，并包含定、转子漏感的无功损耗。

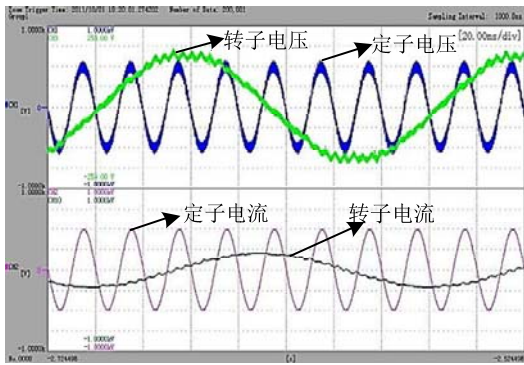


图 11 实测 DFIG 定、转子电流、电压波形

## 5 双馈式变流器主电路硬件设计

获知DFIG的定转子功率关系可以进行变流器的主回路硬件设计。通常的双馈变流器主回路构成如图 12 所示， $K_1$ 、 $K_2$ 分别为定子回路和转子回路接触器， $L_1$ 、 $L_2$ 分别为网侧变流器和电机侧变流器电感。仍采用以上 2MW实际电机参数，简要介绍计算各回路电流值，以此作为器件选型的依据。

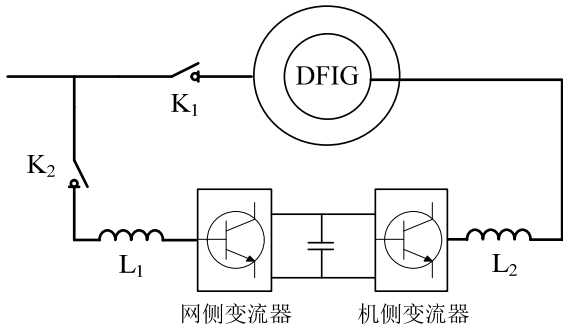


图 12 双馈变流器主电路图

(1) 定子回路电流：由于风力发电机运行在额定转速时发电机功率才达到额定功率。定、转子有功功率满足：

$$P_1 + P_2 = P_1 - s \times P_1 = 2150 \text{ kW} \quad (18)$$

当转速继续上升时，风机保持恒功率运行，由式 (18) 可知定子功率减少而转子功率增加。因此定子最大功率为：

$$P_{1\max} = 2150 / (1 - \frac{1500 - 1755}{1500}) = 1838 \text{ kW} \quad (19)$$

考虑定子功率因数调节范围为  $\lambda = 0.9\text{cap} \sim 0.9\text{ind}$ ，电网电压为 690V，可计算定子回路电流最大值为 1709A。

(2) 网侧变流器回路电流：依据式 (18) 可知，风机运行在最大转速时转子有功功率达到最大值。转子有功功率通过机侧变流器、网侧变流器馈入电

网，因此机侧有功功率等于网侧变流器有功功率。

$$P_{2\max} = 2150 / (1 - \frac{1500}{1500 - 2000}) = 538 \text{ kW} \quad (20)$$

由于网侧变流器功率因数通常为 1，电网电压为 690V，可计算网侧变流器回路最大电流为 450A。

(3) 转子回路电流：根据式 (8) 可推导：

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_1 + \dot{I}_1(Z_1 + Z_m)}{Z_m} = \frac{690 + \dot{I}_1(0.00598 + j0.12 + 0.0686 + j2.67)}{0.0686 + j2.67} \\ &= (6.6345 - j258.26) + \dot{I}_1(1.045 - j0.001084) \\ &\approx -j258.26 + 1.045\dot{I}_1 \end{aligned} \quad (21)$$

由式 (21) 可知当  $|\dot{I}_1|$  达到最大值且  $\dot{I}_1$  功率因数为容性 0.9 时， $|\dot{I}_2|$  达到最大值：

$$|\dot{I}_2|_{\max} = |-j258.26 + 1.045 \times 1709 \times (0.9 - j0.436)| = 1913 \text{ A} \quad (22)$$

通过绕组折算实际转子电流为  $1913 \text{ A} \times 0.376 = 719 \text{ A}$ 。

## 6 结束语

本文推导了 DFIG 的等效电路图，并通过该等效电路计算了 DFIG 定、转子的功率关系，说明了 DFIG 通过转差率及转子电压两个输入变量控制发电机输出功率的机理。并通过软件仿真验证了转子电流、电压、功率与定子功率的关系。同时还通过一个实例说明了如何利用 DFIG 的功率关系及等效电路进行变流器的主电路硬件设计。

### 参考文献：

- [1] 刘其辉,贺益康,张建华.交流励磁变速恒频双馈型异步发电机的稳态功率关系[J].电工技术学报,2006,21(2):42-43.
- [2] 骆皓,郭效军,曹阳,等.双馈发电机定子 PQ 输出数值区间研究[J].电力自动化设备,2009,29(1):106.
- [3] MITSUT(XSHI Y. OSAMU M Active and reactive power control for doubly fed wound rotor induction generator[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1991,6(4):624-629.
- [4] 汤蕴璆.电机学[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [5] 李先允,陈小虎,唐国庆.大型双馈风机稳态运行特性的仿真研究[J].电力自动化设备,2005,25(12):6-9.

作者简介:

肖 遥 (1983-), 男, 工程师, 研究方向为电力电子;

郭 巍 (1984-), 男, 工程师, 研究方向为电力电子;

庄 俊 (1985-), 男, 硕士, 研究方向为风力发电控制技术;

骆 皓 (1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电机与电器。