

# 无刷双馈异步电机潮流建模和收敛性研究

李生虎, 华玉婷, 朱婷涵

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对并网无刷双馈异步电机 (BDFM) 风电机组潮流计算问题, 发现在最大功率点跟踪 (MPPT) 方式下, BDFM 有功出力与电网运行条件有关; 提出 BDFM 与电网联立求解潮流模型。对于受功率调度的 BDFM, 发现有功参考值在低风速下可能得不到满足, 将导致潮流发散; 提出两阶段潮流模型: 首先判断功率调度是否有效, 然后选择 BDFM 潮流约束和求解方法。为改善潮流收敛性, 提出基于转差率或支路功率的 BDFM 初值算法。给出 IEEE RTS 系统中 BDFM 参数计算结果, 以验证所提 BDFM 潮流算法的可行性和正确性。

**关键词:** 无刷双馈异步电机; 潮流建模; 最大功率点跟踪; 有功调度; 收敛性; 改进平电压启动

## Power flow modeling and convergence analysis to brushless doubly-fed induction machines

LI Sheng-hu, HUA Yu-ting, ZHU Ting-han

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To the power flow modeling of the brushless doubly-fed induction generators (BDFMs), it is found that their active output under the maximum power point tracking (MPPT) mode is related to the power system operation condition, thus simultaneous solution to power flow constraints of the BDFMs and the power system is newly proposed. For the BDFMs under power dispatch, it is found that the reference power may not be satisfied by low wind speed, yielding divergence of power flow solution. A two-stage power flow model is newly proposed. Effectiveness of power dispatch object is judged to choose the power constraints and solution procedure for the BDFMs. To improve power flow convergence, the initial setting to the BDFMs set by the rotor slips or branch powers is newly proposed. The numerical results on IEEE RTS test system are provided, which validate the feasibility and accuracy of the proposed models.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277049).

**Key words:** brushless doubly-fed induction machine; power flow modeling; maximum power point tracking; active power dispatch; convergence; modified flat voltage start

中图分类号: TM614; TM734 文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)05-0090-08

## 0 引言

无刷双馈异步电机 (BDFM) 可用于变速驱动<sup>[1-2]</sup>或风力发电<sup>[3-4]</sup>。风力机捕捉风能经传动系统送至 BDFM 转子, 转化为电能注入电网。BDFM 可视为两个同轴相连的异步电机<sup>[5-6]</sup>。变流器 VSCg 维持直流电容电压、发出无功。变流器 VSCc 用于调节控制绕组 CW<sup>[7-8]</sup>, 使得 BDFM 转速、功率因数可调, 因而比笼型异步电机更灵活。由于只有部分功率流过变流器, 经济成本低于直驱式风电机组。由于变流器连接定子而非转子, 不需要滑环和电刷,

因而比普通双馈异步电机 (DFIG) 可靠性更高。

BDFM 的运行, 可采用直接转矩控制<sup>[9]</sup>, 或者基于定子/转子磁链定向的矢量控制<sup>[10-11]</sup>。对应背靠背变流器, 可建立双坐标系, 也可将其归算为单坐标系, 即功率绕组的同步坐标系<sup>[12-13]</sup>。基于单坐标系 dq 表达形式, 可以得到各绕组在 xy 坐标系下的稳态电压、电流和功率关系。例如, 若电网接口电压和 VSCc 交流侧电压已知, 由等效电路<sup>[14-16]</sup>, 可估计功率绕组 (PW)、控制绕组 (CW)、转子绕组功率, 以及能量转换效率<sup>[17-20]</sup>。但对于并网 BDFM, 接口电压由电网潮流决定, VSCc 交流电压幅值和相角由无功出力和两侧有功平衡决定, 同样取决于电网潮流。因此将 VSCc 当作恒定电压源来求解

BDFM 稳态参数, 应用价值有限, 需要建立其并网潮流求解算法。

现有国内、国外文献中尚未发现 BDFM 潮流算法。其建模难点, 不仅在于电机结构复杂。首先, 最大功率跟踪 (MPPT) 方式下, BDFM 有功出力不仅仅取决于风速。由于容量小而电阻大, 内部损耗不能忽略。而损耗与绕组电流有关, 后者又取决于无功和电压, 因此 BDFM 有功出力与电网潮流有关, 在求解潮流之前未知。其次, 随着并网容量增加, BDFM 需接受电网调度, 以降低风电随机波动、减少快速备用容量<sup>[21-23]</sup>。与传统火电/水电机组不同, 在低风速时 BDFM 调度出力未必可实现, 此时潮流无解。第三, BDFM 约束方程比其他风电机组多, 在超同步/次同步间转换时, 待求解变量可能振荡, 导致潮流收敛性很差。

基于 BDFM 等效电路, 研究了其潮流建模及收敛性问题。提出 MPPT 方式下 BDFM 潮流方程。此时由于有功出力未知, 电机与电网方程须联立求解, 接口节点有一个有功约束和两个无功约束。对于受电网调度 BDFM, 提出两阶段潮流模型。第一阶段按 MPPT 方式, 计算最大有功出力, 判断调度值能否满足。如果满足, 将 BDFM 视为 PQ 节点。计算电网潮流, 得到接口电压后, 计算 BDFM 内部参数。鉴于平电压启动条件下 BDFM 收敛性较差, 提出根据转差率或支路有功设置初值以改善收敛性。计算结果验证了算法正确性。

## 1 MPPT 方式下 BDFM 潮流模型

对图 1 所示 BDFM 风电机组, 基于 PW 同步坐标系, 建立等效电路 (图 2), 其中下标 p 表示接口节点和 PW, c 表示 CW 和 VSCc, g 表示 VSCg, r 表示转子, T 表示变压器, BDFM 表示 BDFM 总体参数。BDFM 铁损相对较大, 但远比铜损较小, 将其忽略后, 励磁支路简化为对地电抗  $X_{rp}$  和  $X_{rc}$ 。

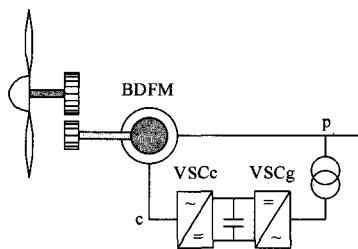


图 1 BDFM 风电机组

Fig. 1 BDFM for wind energy conversion

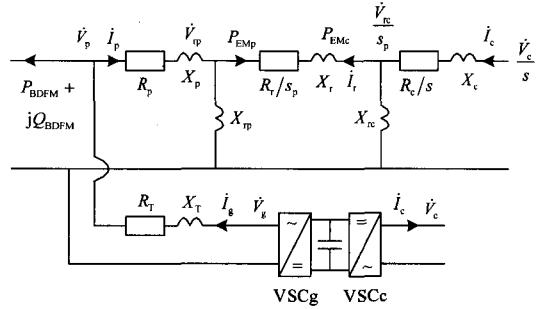


图 2 BDFM 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of BDFM

忽略变流器损耗, BDFM 输出功率与绕组电流有关式(1), 而电流又取决于节点电压和绕组无功, 最终依赖于电网潮流分布。MPPT 方式下, 即使风速、风力机转速  $\omega_{wt}$  及捕捉功率  $P_{wt}$  都不变, 在电网潮流求解之前 BDFM 有功出力未知, 因此需要联立求解电机和电网的潮流约束。

$$P_{BDFM} = P_{wt} - \Delta P_{BDFM} = P_{wt} - (I_p^2 R_p + I_r^2 R_r + I_c^2 R_c + I_g^2 R_g) \quad (1)$$

对节点 p, 从电网侧看功率约束方程如式(2)和式(3), 其中下标 sys 表示电网, set 表示设定参考值。

$$\Delta P_{sys,p} = P_{BDFM} - \operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_{BDFM}^*) = -P_{p,sp} - P_{pg} - \operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_{BDFM}^*) = 0 \quad (2)$$

$$\Delta Q_{sys,p} = Q_{BDFM,sp} - \operatorname{Im}(\dot{V}_p \dot{I}_{BDFM}^*) = 0 \quad (3)$$

从电机侧看, 节点 p 只有无功功率约束:

$$\Delta Q_p = -Q_{p,sp} - Q_{pg} - Q_{BDFM,sp} = 0 \quad (4)$$

节点 rp 有功和无功潮流约束为

$$\Delta P_{rp} = -P_{rp,p} - P_{rp,rc} = 0 \quad (5)$$

$$\Delta Q_{rp} = -Q_{rp,p} - Q_{rp,rc} = 0 \quad (6)$$

节点 rc 有功和无功潮流约束为

$$\Delta P_{rc} = -P_{rc,sp} - P_{rc,c} = 0 \quad (7)$$

$$\Delta Q_{rc} = -Q_{rc,sp} - Q_{rc,c} = 0 \quad (8)$$

节点 g 有功和无功潮流约束为

$$\Delta P_g = -s P_{c,rc} - P_{gp} = 0 \quad (9)$$

$$\Delta Q_g = Q_{g,sp} - Q_{gp} = 0 \quad (10)$$

定、转子有功平衡见式(11)。其等值形式为式(12), 其中  $P_M$  是输出机械功率。由此得到电磁功率和机械功率平衡式(13)。

$$\operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_p^*) + \operatorname{Re}\left(\frac{\dot{V}_c}{s} \dot{I}_c^*\right) = I_p^2 R_p + I_r^2 \frac{R_r}{s_p} + I_c^2 \frac{R_c}{s} \quad (11)$$

$$\operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_p^*) + \operatorname{Re}(\dot{V}_c \dot{I}_c^*) = I_p^2 R_p + I_r^2 R_r + I_c^2 R_c + P_M \quad (12)$$

$$\Delta P_M = \operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_p^*) + \operatorname{Re}(\dot{V}_c \dot{I}_c^*) - I_p^2 R_p - I_r^2 R_r - I_c^2 R_c - P_M \quad (13)$$

忽略传动损耗,  $P_M = -P_{wt}$ , 其中风力机捕捉功率  $P_{wt}$  由功率系数  $C_p$  决定式(14), 其中:  $\rho$  是空气密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $v_w$  是风速( $\text{m}/\text{s}$ );  $A = \pi R^2$  是扫风面积( $\text{m}^2$ );  $R$  是风力机半径( $\text{m}$ );  $P_N$  是 BDFM 额定容量( $\text{MW}$ )。

$$P_{wt} = \frac{\rho A v_w^3}{2 P_N} C_p \quad (14)$$

$C_p$  是叶尖速比  $\lambda$  和桨距角  $\beta$  的函数式(15)<sup>[3]</sup>, 其中  $c_1 \sim c_5$  是系数项。对于给定风速, 通过  $C_p$  函数搜索对应风力机最大出力  $P_{wtmax}$  的最优转速  $\omega_{wtop}$ 。

$$C_p = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda} - c_5 \beta} \quad (15)$$

PW 转差率  $s_p$  和风力机转速  $\omega_{wt}$  的转换关系如式(16), 其中  $\eta$  是增速比,  $\omega_s$  是同步角速度( $\text{rad}/\text{s}$ )。

$$s_p = 1 - \omega_r = 1 - \omega_{wt} \frac{\eta p_r}{\omega_s} \quad (16)$$

在 MPPT 方式下, 联立 BDFM 功率约束和电网潮流方程如式(17), 其中  $\mathbf{J}$  是雅可比矩阵。对于接口节点, 有 1 个有功方程(对外), 2 个无功约束(对内、对外)。每增加一台 BDFM, 新增 8 个约束方程。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{sys} \\ \Delta Q_{sys} \\ \Delta P_M \\ \Delta Q_p \\ \Delta P_{rp} \\ \Delta Q_{rp} \\ \Delta P_{rc} \\ \Delta Q_{rc} \\ \Delta P_g \\ \Delta Q_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{sys} & \mathbf{J}_{sys,BDFM} \\ \mathbf{J}_{BDFM,sys} & \mathbf{J}_{BDFM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{sys} \\ \Delta V_{sys} \\ \Delta \theta_{rp} \\ \Delta V_{rp} \\ \Delta \theta_{rc} \\ \Delta V_{rc} \\ \Delta \theta_c \\ \Delta V_c \\ \Delta \theta_g \\ \Delta V_g \\ \Delta P_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

## 2 功率调度方式 BDFM 潮流模型

当风电机组出力完全由随机风速时, 需要大量的备用容量。如果象欧洲部分国家风电比例达到 10%甚至 20%多, 若不调度风电, 仅凭储能容量远远不够, 而完全依赖火电/火电机组提供备用, 经济性和可靠性将很难接受。目前我国电网风电调度,

是停运部分风电机组以降低风电场出力。其实对于变速风电机组, 通过设置转速低于最优转速, 可以将其出力控制在设定值。这样可以避免风电机组反复起停, 平抑风电功率波动, 降低快速旋转备用机组容量<sup>[24]</sup>, 提高风电系统运行经济性和可靠性。

如果 BDFM 可发有功出力大于调度出力, 则调度有效。此时 BDFM 可视为一个 PQ 节点, 代入现有潮流模型, 得到接口节点电压幅值和相角为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{sys} \\ \Delta Q_{sys} \end{bmatrix} + \mathbf{J}_{sys} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{sys} \\ \Delta V_{sys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (18)$$

利用接口节点出力和电压, 计算 BDFM 内部参数。由于 BDFM 出口有功已知, 增加约束式(19), 共有 9 个约束式(20), 独立求解。若采用桨距角控制, 将  $\Delta s$  替换为  $\Delta \beta$ , 约束个数不变。

$$\Delta P_p = -P_{p,RP} - P_{pg} - P_{BDFM,SET} = 0 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_p \\ \Delta Q_p \\ \Delta P_{rp} \\ \Delta Q_{rp} \\ \Delta P_{rc} \\ \Delta Q_{rc} \\ \Delta P_g \\ \Delta Q_g \\ \Delta P_M \end{bmatrix} + \mathbf{J}_{BDFM} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{rp} \\ \Delta V_{rp} \\ \Delta \theta_{rc} \\ \Delta V_{rc} \\ \Delta \theta_c \\ \Delta V_c \\ \Delta \theta_g \\ \Delta V_g \\ \Delta s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

一般实际调度目标相对固定, 而风速一直变化。当风速较低时, BDFM 最大出力可能达不到调度目标, 导致上式无实际解。因此对于给定风速, 需要预先判断 BDFM 功率调度是否有效。

对接受电网调度的 BDFM, 提出两阶段潮流模型(图 3)。首先按照 MPPT 方式, 计算 BDFM 最大出力, 将其与调度目标比较。如果前者小于后者, 说明调度无效, 该机组仍处于 MPPT 方式。否则调度有效, 依次计算电网潮流和 BDFM 内部参数。

## 3 改善收敛性的 BDFM 初值方法

按平电压启动设置 BDFM 内部节点电压初值, 潮流收敛性较差, 因此需要改善其初值, 主要是节点  $rc$  和  $c$  电压相角。研究发现, 在 MPPT 方式下, 可根据支路功率或转差率设置初值; 在有效功率调度方式下算 BDFM 参数时, 可以沿用 MPPT 方式下结果作为其初值。

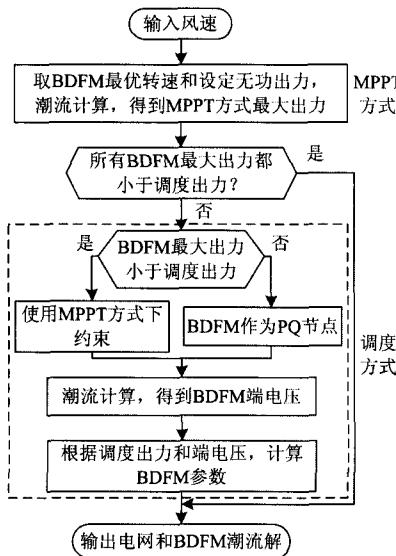


图3 受调度BDFM潮流算法

Fig. 3 Power flow algorithm for BDFM under dispatch

### 3.1 根据转差率设定初值

设 PW 极对数为  $p_p$ , 磁场旋转频率和角速度分别为  $f_p$  和  $n_p$ ; CW 相应参数分别为  $p_c$ 、 $f_c$  和  $n_c$ 。两个定子绕组磁场可能同向或反向, 以+和-表示。转子等效极对数  $p_r = p_p + p_c$ , 转速  $n_r$  为

$$n_r = \frac{p_p n_p + p_c n_c}{p_p + p_c} = \frac{60(f_p \pm f_c)}{p_p + p_c} \quad (21)$$

定子绕组和转子绕组间的转差率定义见式(22)、式(23)。定子绕组之间的转差率见式(24)。

$$s_p = \frac{n_p - n_r}{n_p} = \frac{p_c f_p \mp p_p f_c}{(p_p + p_c) f_p} \quad (22)$$

$$s_c = \frac{n_c \mp n_r}{n_c} = \frac{p_p f_c \mp p_c f_p}{(p_p + p_c) f_c} \quad (23)$$

$$s = \frac{s_p}{s_c} = \mp \frac{f_c}{f_p} \quad (24)$$

将式(22)和式(23)代入式(24), 得式(25)。由此可见, 对于  $s$ 、 $s_p$  和  $s_c$ , 知道其中一个即可推出另外两个。

$$s_p = \frac{n_p - n_r}{n_p} = \frac{p_c}{p_p + p_c} + \frac{p_p}{p_p + p_c} s \quad (25)$$

如果忽略风力机, 采用的恒  $k_{opt}$  模型计算结果与其初始假设相互矛盾。若计及风力机模型, BDFM 潮流收敛性极差, 原因在于部分电压和电阻与转差有关。对于电机等效电路内部节点, 一般按照平电压启动, 即  $1 \angle 0$ 。当转差率从正变负(或由负变正), 哪怕只是变化一点点, 潮流解也将大幅振荡, 很容

易发散。

因此提出改进平电压启动算法, 不要求电压初始幅值为 1, 初始相角为 0, 而是根据转速初值设置电压初值。

$$V_{rc} = |s_p|, \theta_{rc} = \begin{cases} 0, s_p > 0 \\ \pi, s_p < 0 \end{cases} \quad (26)$$

$$V_c = |s|, \theta_c = \begin{cases} 0, s > 0 \\ \pi, s < 0 \end{cases} \quad (27)$$

这样, 节点电压  $\dot{V}_{rc}$  和  $\dot{V}_c$  不满足平电压启动, 但是等效电压满足平电压启动。

$$\frac{\dot{V}_{rc}}{s_p} = \frac{V_{rc}}{s_p} \angle \theta_{rc} = 1 \angle 0, \frac{\dot{V}_c}{s} = \frac{V_c}{s} \angle \theta_c = 1 \angle 0 \quad (28)$$

从而有可能改善收敛性。根据转差率设置电压幅值/相角初值, 实现非常简单。缺点是当调度出力与最大出力差距较多时, 转差率初值和最终解差异较大。特别是如果两者穿越同步转速时, 潮流解仍有可能振荡甚至不收敛。

### 3.2 根据支路功率设定初值

定义 PW 和 CW 提供的电磁功率  $P_{EMp}$  和  $P_{EMc}$  为

$$P_{EMp} = \operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_p^*) = \operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_p^*) - I_p^2 R_p \quad (29)$$

$$P_{EMc} = s \operatorname{Re}(\dot{V}_c \dot{I}_c^*) = \operatorname{Re}(\dot{V}_c \dot{I}_c^*) - I_c^2 R_c \quad (30)$$

由式(12)~式(11)×s得式(31)。将式(29)代入得式(32)。

$$P_M = (1-s) \operatorname{Re}(\dot{V}_p \dot{I}_p^*) - (1-s) I_p^2 R_p - \left(1 - \frac{1}{s_c}\right) I_r^2 R_r \quad (31)$$

$$P_M = (1-s) P_{EMp} - \left(1 - \frac{1}{s_c}\right) I_r^2 R_r \quad (32)$$

由式(12)~式(11)得式(33)。将式(30)代入, 得式(34)。

$$\left(1 - \frac{1}{s}\right) \operatorname{Re}(\dot{V}_c \dot{I}_c^*) = \left(1 - \frac{1}{s_p}\right) I_r^2 R_r + \left(1 - \frac{1}{s}\right) I_c^2 R_c + P_M \quad (33)$$

$$P_M = \left(1 - \frac{1}{s}\right) P_{EMc} - \left(1 - \frac{1}{s_p}\right) I_r^2 R_r \quad (34)$$

联立式(32)和式(34), 消去  $P_M$ , 得

$$s_p (s_c - s_p) P_{EMp} = s_c (s_p - s_c) P_{EMc} + (s_c - s_p) I_r^2 R_r \quad (35)$$

忽略转子电阻, 得  $P_{EMp}$  和  $P_{EMc}$  比值式(36)。忽略  $R_p$ 、 $R_T$ 、 $R_c$ , 即为  $P_{pg}$  和  $P_{p,sp}$  的比值。由  $P_{p,sp}$  和  $P_{pg}$  之和为  $-P_{BDFM}$ , 可估计  $P_{p,sp}$  和  $P_{pg}$ 。

$$\frac{P_{EMc}}{P_{EMp}} = -\frac{s_p}{s_c} = -s \approx \frac{P_{pg}}{P_{p,rp}} \quad (36)$$

若任一支路 $ij$ 有功潮流 $P_{ij}$ 见式(37), 假设其端电压为额定值, 则有式(38)。两边取平方, 求解该一元二次方程, 得 $\sin \theta_{ij}$ 。若 $\theta_i$ 初值已知, 则由 $\theta_{ij}$ 可大致设定 $\theta_j$ 初值。

$$P_{ij} = \frac{R_{ij}V_i^2}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} - V_iV_j \frac{R_{ij} \cos \theta_{ij} - X_{ij} \sin \theta_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (37)$$

$$R_{ij}\sqrt{1-\sin^2 \theta_{ij}} = R_{ij} - P_{ij}(R_{ij}^2 + X_{ij}^2) + X_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (38)$$

根据支路有功, 可以设置电压相角初值, 但不能给出幅值初值。当绕组电阻较大时, 误差较大。

#### 4 算例分析

算例采用 IEEE RTS 节点测试系统(图 4) [25]。在节点 3 和 19, 通过降压变压器, 连接两个风电场(节点 25 和 26, 记为 1# 和 2# 风电场), 分别拥有 50 和 60 台 BDFM。风力机叶片半径 10.4 m,  $C_p$  函数系数为  $c_1=25, c_2=9.4118, c_3=1, c_4=20, c_5=0.2^{[3]}$ 。增速比  $\eta=16$ , 极对数  $p_p=3, p_c=1$ 。BDFM 单机容量为 4 kW。以此为基准, 绕组阻抗为  $R_p=0.0827$  pu,  $X_p=0.0202$  pu,  $X_{rp}=1.6324$  pu,  $R_r=0.0615$  pu,  $X_r=0.1675$  pu,  $R_c=0.1381$  pu,  $X_c=0.0494$  pu,  $X_{rc}=1.7183$  pu,  $R_t=0.03$  pu,  $X_t=0.05$  pu<sup>[1]</sup>。电机转速允许范围为-40%~40%。将同一风电场 BDFM 聚合成一台, 按电网基准容量 100 MVA, 折算阻抗和容量等参数。

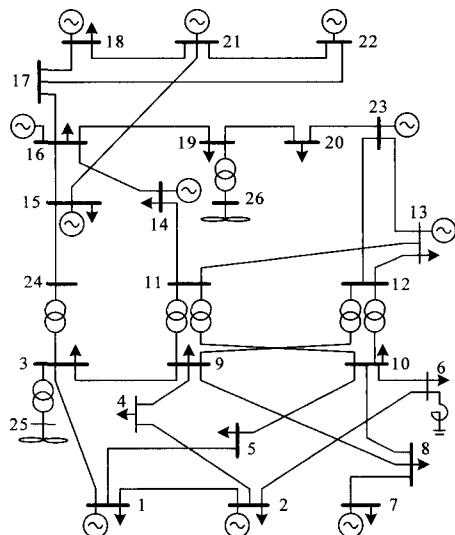


图 4 IEEE RTS 测试系统

Fig. 4 IEEE RTS test system

#### 4.1 MPPT 方式下 BDFM 潮流解

取两个风电场风速分别为 10 m/s 和 4.5 m/s, 计

算 MPPT 方式下风力机最大出力和最优转速, 以及并网后 BDFM 参数, 结果见表 1。作为对比, 若两个风电场不并网, 节点 25 和节点 26 电压分别为 0.9559 pu  $\angle -0.2481$  rad 和 0.9916 pu  $\angle -0.0257$  rad。显然 BDFM 注入功率越大, 对电网潮流影响越明显。

表 1 MPPT 方式下 BDFM 潮流解  
Table 1 Power flow solution of BDFM under MPPT mode

参数	1# 风电场	2# 风电场
$v_w$ /(m/s)	10.00	4.50
$s_p$	-0.2800	-0.1285
$s$	-0.7067	-0.5047
$\beta$ /(°)	0	0
$P_{wmax}$ /pu	0.0027	0.0015
$V_p$ /pu	0.9560	0.9916
$\theta_p$ /rad	-0.2478	-0.0257
$P_{BDFM}$ /pu	0.0017	0.0006
$Q_{BDFM}$ /pu	0.0004	0.0005
$V_r$ /pu	1.0270	1.0338
$\theta_r$ /rad	-0.2399	-0.0246
$V_c$ /pu	0.2840	0.1314
$\theta_c$ /rad	3.2042	3.5556
$V_t$ /pu	0.7299	0.5737
$\theta_t$ /rad	3.5298	3.9228
$V_g$ /pu	0.9623	0.9894
$\theta_g$ /rad	-0.2492	-0.0407

#### 4.2 有功调度下 BDFM 潮流解

以其自身容量为基准, 设定 1# 风电场参考出力  $P_{BDFMset}=0.4$  pu,  $Q_{BDFMset}=0.2$  pu,  $Q_{gset}=0.1$  pu。对 2# 风电场, 设定  $P_{BDFMset}=0.6$  pu,  $Q_{BDFMset}=0.2$  pu,  $Q_{gset}=0.1$  pu。按电网基准 100 MVA 折算, 分别为 0.0008 pu、0.0004 pu、0.0002 pu 和 0.00144 pu、0.00048 pu、0.00024 pu。由表 1 知, 1# 风电场可发出力为 0.0017 pu, 大于参考值, 调度有效; 2# 风电场可发出力 0.0006 pu, 小于参考值, 调度无效。

按参考值设定 1# 风电场出力, 视其为 PQ 节点; 2# 风电场仍与电网方程联立, 求解电网潮流分布。节点 25、26 电压分别为 0.9560 pu  $\angle -0.2480$  rad 和 0.9916 pu  $\angle -0.0257$  rad。

按照调度参考值, 以及接口节点电压, 分别按转速控制和桨距角调节方式, 计算 1# 风电场参数, 结果见表 2。在调度控制方式下, 由于有功出力受限, 导致 BDFM 内部参数与 MPPT 方式下不同。采用转速控制或桨距角调节, 都可以实现 BDFM 降额运行, 从电网角度, 两者效果相同。但是从电机来

看, 两者调节效果不同。桨距角调节只影响风力机出力; 转速调节不仅影响风力机出力, 还影响电机转速和绕组阻抗。

表 2 有效调度方式下 BDFM 潮流解

Table 2 Power flow solution of BDFM under effective dispatch

参数	转速调节	桨距角调节
$s_p$	-0.152 1	-0.280 0
$s$	-0.536 1	-0.706 7
$\beta/(\circ)$	0	2.868 8
$V_p/\text{pu}$	0.956 0	0.956 0
$\theta_p/\text{rad}$	-0.248 0	-0.248 0
$P_{\text{BDFM}}/\text{pu}$	0.000 8	0.000 8
$Q_{\text{BDFM}}/\text{pu}$	0.000 4	0.000 4
$V_{\text{tp}}/\text{pu}$	1.008 1	0.998 2
$\theta_{\text{tp}}/\text{rad}$	-0.244 6	-0.246 9
$V_{\text{rc}}/\text{pu}$	0.147 5	0.291 1
$\theta_{\text{rc}}/\text{rad}$	-2.966 9	3.126 5
$V_c/\text{pu}$	0.564 3	0.769 7
$\theta_c/\text{rad}$	-2.585 0	-2.885 5
$V_g/\text{pu}$	0.955 6	0.959 2
$\theta_g/\text{rad}$	-0.260 9	-0.254 7

为了进一步验证算法正确性, 逐渐降低有功参考出力, 计算相应转速或桨距角, 以及BDFM电机能量转换效率见表3、表4。结果表明:

(1) 通过适当降低转速或者桨距角, 都可以满足电网调度对BDFM出力要求。

(2) 显然, BDFM参考出力越低, 电机效率越低。桨距角控制时, 电机效率高于转速调节。

表 3 基于转速调节的有功调度结果

Table 3 Power dispatch by adjusting rotor speed

$P_{\text{BDFM}}/\text{set}/10^3 \text{ pu}$	$s_p$	$P_{\text{wt}}/10^3 \text{ pu}$	效率/%
0.8	-0.272 1	1.305 1	0.613 0
0.7	-0.244 8	1.178 1	0.594 2
0.6	-0.216 4	1.052 9	0.569 9
0.5	-0.186 7	0.929 9	0.537 7
0.4	-0.155 8	0.809 8	0.493 9
0.3	-0.123 4	0.694 2	0.432 2
0.2	-0.090 8	0.587 7	0.340 3
0.1	-0.062 6	0.504 1	0.198 4

#### 4.3 BDFM 潮流收敛性

按平电压启动条件, 设置电网和BDFM各节点电压幅值和相角, BDFM按MPPT方式运行, 求解电网潮流, 迭代误差(最大偏差量, 指数表示)见图5, 迭代100次后误差仍然很大, 不能满足收敛条件。

表 4 基于桨距角调节的有功调度结果

Table 4 Power dispatch by adjusting pitch angle

$P_{\text{BDFM}}/\text{set}/10^3 \text{ pu}$	$\beta/(\circ)$	$P_{\text{wt}}/10^3 \text{ pu}$	效率/%
0.8	0.158 1	1.300 9	0.615 0
0.7	0.722 5	1.162 0	0.602 4
0.6	1.333 9	1.028 3	0.583 5
0.5	2.004 4	0.899 3	0.556 0
0.4	2.751 1	0.774 5	0.516 5
0.3	3.598 7	0.653 7	0.458 9
0.2	4.585 6	0.536 6	0.372 7
0.1	5.775 7	0.423 0	0.236 4

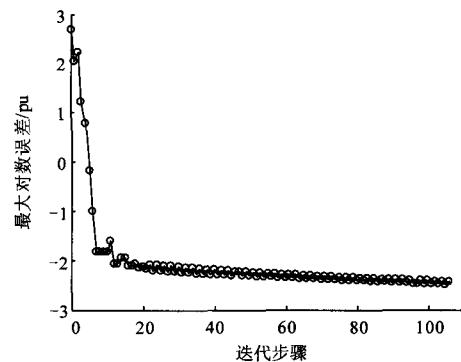


图 5 平电压启动的迭代误差

Fig. 5 Iteration error with flat voltage start

表1~表4采用了改进初值算法。鉴于算例选择的BDFM电阻较大, 根据MPPT方式下风力机转差率, 设定节点rc和c电压初值。图6给出迭代误差。结果表明, 引入BDFM并未显著降低电网潮流收敛速度。无论MPPT方式下, 还是电网调度方式下, 经过4~5次迭代, 最大偏差均降至 $10^{-10}$  pu以下, 证实所提初值算法对改善潮流收敛性的效果。

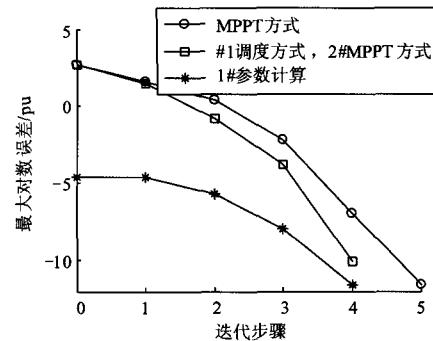


图 6 改进平电压启动时迭代误差

Fig. 6 Iteration error with modified flat voltage start

## 5 结论

提出了无刷双馈电机在最大功率点跟踪和有功调度方式下潮流模型; 为提高收敛性, 提出了改进平电压启动算法, 证实以下结论:

(1) BDFM 有功出力不仅取决于风速和风力机转速, 还取决于 BDFM 内部损耗, 后者与电网运行条件有关, 因此 MPPT 方式下, 需要联立求解 BDFM 和电网潮流约束。

(2) 考虑可发有功出力与调度参考出力大小, 不能将受调度 BDFM 简单设置为 PQ 节点, 而应先判断有功调度是否有效, 然后选择联立或独立求解算法。

(3) 含 BDFM 风电系统潮流收敛性, 与 BDFM 参数初值极为密切。根据转差率修正相角初值以满足平电压启动条件, 可显著改善潮流收敛性。

## 参考文献

- [1] SHAO S, ABDI E, MCMAHON R. Low-cost variable speed drive based on a brushless doubly-fed motor and a fractional unidirectional converter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 317-325.
- [2] MCMAHON R A, ROBERTS P C, WANG X, et al. Performance of BDFM as generator and motor[J]. IEE Proceedings Electrical Power Applications, 2006, 153(2): 289-299.
- [3] VALENCIAGA F, PULESTON P F. Variable structure control of a wind energy conversion system based on a brushless doubly fed reluctance generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 499-506.
- [4] PROTSENKO K, XU D. Modeling and control of brushless doubly-fed induction generators in wind energy applications[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(3): 1191-1197.
- [5] 杨顺昌. 无刷双馈电机的电磁设计特点[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 107-110.  
YANG Shun-chang. Feature of electromagnetic design for brushless doubly-fed machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 107-110.
- [6] 卞松江, 贺益康, 潘再平. 级联式无刷双馈电机的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 33-37.  
BIAN Song-jiang, HE Yi-kang, PAN Zai-ping. Modeling and simulation of the cascade brushless doubly-fed machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 33-37.
- [7] 熊飞, 王雪帆, 张经纬, 等. 无刷双馈电机的小信号模型稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 117-123.  
XIONG Fei, WANG Xue-fan, ZHANG Jing-wei, et al. Stability analysis of small signal model for brushless doubly-fed machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 117-123.
- [8] 黄守道, 王耀南, 王毅, 等. 无刷双馈电机有功和无功功率控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 87-93.  
HUANG Shou-dao, WANG Yao-nan, WANG Yi, et al. A study of active and reactive power control for brushless doubly-fed machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 87-93.
- [9] SARASOLA I, POZA J, RODRIGUEZ M A, et al. Direct torque control design and experimental evaluation for the brushless doubly fed machine[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2): 1226-1234.
- [10] SHAO S, ABDI E, BARATI F, et al. Stator-flux-oriented vector control for brushless doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(10): 4220-4228.
- [11] ZHOU D, SPEE R, ALEXANDER G C. Experimental evaluation of a rotor flux oriented control algorithm for brushless doubly-fed machines[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997, 12(1): 72-78.
- [12] POZA J, OYARBIDE E, ROYE D, et al. Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine[J]. IEE Proc Electrical Power Applications, 2006, 153(5): 726-734.
- [13] LI R, WALLACE A, SPEE R, et al. Two-axis model development of cage-rotor brushless doubly-fed machines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6(3): 453-460.
- [14] ROBERTS P C, MCMAHON R A, TAVNER P J, et al. Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification[J]. IEE Proc Electrical Power Applications, 2005, 152(4): 933-942.
- [15] 邓先明, 姜建国, 方荣惠. 笼型转子无刷双馈电机的电磁分析和等效电路[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 19-23.  
DENG Xian-ming, JIANG Jian-guo, FANG Rong-hui. Electromagnetic analysis and equivalent circuit of

- brushless doubly-fed machine with cage rotor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 19-23.
- [16] 熊飞, 王雪帆, 张经纬, 等. 绕线转子无刷双馈电机的链型等效电路模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 15-21.  
XIONG Fei, WANG Xue-fan, ZHANG Jing-wei, et al. Chain equivalent circuit model of wound-rotor brushless doubly-fed machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 15-21.
- [17] GOD B V, ALEXANDER G C, SPEE R. Power balance considerations for brushless doubly-fed machines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(4): 687-692.
- [18] 邓先明, 谭国俊, 袁启东, 等. 无刷双馈电机的功率研究[J]. 电气自动化, 2008, 30(1): 16-20.  
DENG Xian-ming, TAN Guo-jun, YUAN Qi-dong, et al. Study of the power of the doubly-fed induction machine [J]. Electrical Automation, 2008, 30(1): 16-20.
- [19] 杨向宇, 励庆孚. 无刷双馈调速电机稳态运行特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 14-17.  
YANG Xiang-yu, LI Qing-fu. Steady state performance of brushless doubly-fed machines for adjustable speed drives[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4): 14-17.
- [20] 王晓远, 汤海梅. 无刷双馈电机的效率分析[J]. 电气传动, 2007, 37(6): 59-61.  
WANG Xiao-yuan, TANG Hai-mei. Analysis of efficiency for brushless doubly-fed machine[J]. Electrical Automation, 2007, 37(6): 59-61.
- [21] 黄大为, 张伟, 韩学山. 一种考虑系统有功调节能力的风电功率场景选取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 33-39.  
HUANG Da-wei, ZHANG Wei, HAN Xue-shan. A wind power scenarios' selection method considering the active power dispatching ability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 33-39.
- [22] 查浩, 石文辉. 协调电网接纳风电能力的概率优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 14-18.  
ZHA Hao, SHI Wen-hui. Study on power grid probabilistic optimal dispatch of coordinating wind power accommodation capability[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 14-18.
- [23] 王洪涛, 刘雪芳, 负志皓, 等. 含风电场群的区域电网两层多阶段电压协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 1-7, 13.  
WANG Hong-tao, LIU Xue-fang, YUN Zhi-hao, et al. Two-tier and multi-stage voltage coordination control method for regional power grid with wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 1-7, 13.
- [24] LI S. Power flow modeling to doubly-fed induction generators (DFIGs) under power regulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(3): 3292-3301.
- [25] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.

收稿日期: 2013-07-19; 修回日期: 2013-11-29

作者简介:

李生虎(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术在电力系统中的应用; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

华玉婷(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性。

朱婷涵(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电系统分析与控制。