

(7) 36-42

# 异步化发电机有功 和无功调节特性的仿真研究<sup>\*</sup>

Simulation Investigation for the Regulating Characteristics of  
Real and Reactive Power of Asynchronized Turbogenerators

梁志翔  
Liang Zhixiang

杨顺昌  
Yang Shunchang

秦翼鸿  
Qing Yihong

徐国禹  
Xu Guoyu

(重庆大学电气工程系, 重庆, 630044)

TM311

**摘 要** 论述了异步化发电机的双通道励磁控制原理, 推导了以转子电流为状态变量的状态方程式及转子运动方程, 通过对一台200 MW 异步化汽轮发电机运行特性的仿真计算, 研究了异步化汽轮发电机的稳态有功、无功(电压)调节特性。

**关键词** 有功功率; 无功功率; 异步化汽轮发电机 / 调节特性

**中国图书资料分类法分类号** TM311

**ABSTRACT** This paper discusses the controlling principle of asynchronized turbogenerators, deduces their mathematical model, and studies their regulating characteristics of real and reactive power (or voltage) by means of simulation calculation of operating characteristics for a 200 MW asynchronized turbogenerator. The conclusion is that the asynchronized tubogenerators not only can regulate real and reactive power independently but also has an excellent dynamic performance.

**KEYWORDS** real power; reactive power; asynchronized turbogenerator; regulating characteristics

## 0 引 言

现代电力系统随着发电机单机容量的增大, 输电距离的加长, 电网电压的等级不断提高, 电网日负荷曲线剧烈变化, 致使输电线路的有功、无功运行状态发生变化。当线路传输的有功功率低于线路的自然功率时, 将出现无功过剩。而长距离超高压输电线的广泛采用, 则使得由线路充电功率所引起的无功过剩和系统稳定问题日益突出。

无功过剩会引起输电线首端出现持续工频过电压, 产生电晕引起有功损耗增加, 危及系统安全运行, 严重时致使其它发电机无法并网。为解决上述问题, 电站必须进入吸无功状态运行。电站的这种运行状态可采用: 同步发电机进相运行, 在电站安装并联电抗器、调相机和

\* 收文日期 1993-12-24

本课题为国家教委博士点基金资助课题

静止补偿器等传统方法。但这些方法都存在一定的技术经济缺陷。

采用在电站安装异步化汽轮发电机可以使无功过剩问题得到圆满的解决。异步化汽轮发电机转子具有两个或多个励磁绕组,可使其合成磁势处于转子任意位置,并能实现对有功功率和无功功率的独立调节。

本文首先分析异步化汽轮发电机的电气结构和控制原理,进而推导其状态方程,最后对仿真计算的结果进行分析讨论。

## 1 异步化控制原理

异步化汽轮发电机与传统汽轮发电机一样由交流电机本体、励磁系统及自动励磁调节器三部分组成。它与传统汽轮发电机的差别是:异步化汽轮发电机在转子上存在两个以上的励磁绕组,它们按一定的电角度分布在转子圆周上,通过一套可逆可控硅励磁装置和双通道励磁调节器对转子绕组励磁。本文研究的异步化汽轮发电机转子具有对称两相励磁绕组。

假设发电机经变压器升压后通过双回输电线接于无穷大系统,如图 1 所示。图中,  $X_T$  为变压器电抗,  $X_L$ 、 $X_C$  分别为传输线的感抗和容抗。

异步化汽轮发电机的一般化电机模型如图 2 所示。图中所用坐标系为同步旋转  $X$ 、 $Y$  坐标系,  $Y$  轴与电网电压的相量重合,  $f_1$ 、 $f_2$  为转子励磁绕组,  $D_1$ 、 $D_2$  为等效阻尼绕组,反映转子实心体的阻尼效应;  $\delta$  为转子位置角,  $\theta$  为电磁功角。同步旋转磁场速度为  $\omega_1$ , 转子速度为  $(1 \pm s)\omega_1$ , 转子转速超同步旋转速度时括号内取正。

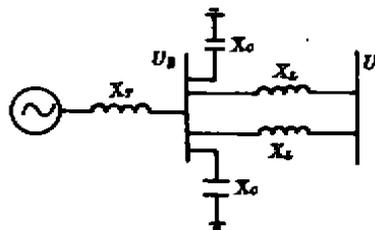


图 1 单机无穷大系统

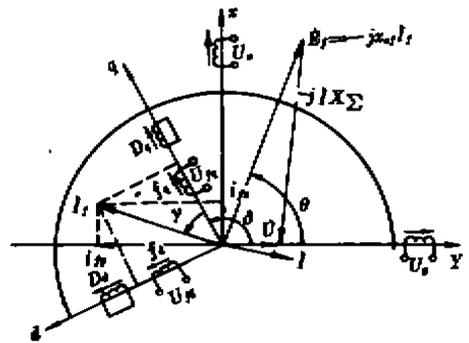


图 2 一般化电机模型

参考文献[1]~[4],图 2 所示异步化汽轮发电机定子回路电压方程的相量形式为:

$$-U = j(X_{\Sigma}I + X_{sr}I_r) \tag{1}$$

式中  $U$ 、 $I$  分别为定子电压、电流相量;

$I_r$  为转子励磁绕组的电流相量;

$X_{sr}$  为定转子互感抗;

$X_{\Sigma} = X + X_T + X_L / 2 - (X + X_T)X_L / X_C$  为计及线路参数的定子等效电抗;

$X = X_{sr} + X_s$  为同步电抗;

$X_r = X_{sr} + X_{r\sigma}$  为转子励磁绕组的电抗;

$X_s$  为定子绕组的漏感抗。

将(1)式投影在同步坐标  $X$ 、 $Y$  轴上,则:

$$\begin{cases} -U = -X_{\Sigma} i_x - X_{st} i_{tx} \\ 0 = X_{\Sigma} i_y + X_{st} i_{ty} \end{cases} \quad (2)$$

由上式可得:

$$\begin{cases} i_x = \frac{U}{X_{\Sigma}} - \frac{X_{st}}{X_{\Sigma}} i_{tx} \\ i_y = \frac{X_{st}}{X_{\Sigma}} i_{ty} \end{cases} \quad (3)$$

按发电机有功功率和无功功率的定义,当采用标么值时:

$$M_{em} = P = R_e [UI^*] = U i_y = -\frac{UX_{st} i_{ty}}{X_{\Sigma}} \quad (4)$$

$$Q = I_m [UI^*] = -U i_x = \frac{UX_{st} i_{tx}}{X_{\Sigma}} - \frac{U^2}{X_{\Sigma}} \quad (5)$$

由以上两式可知,控制励磁电流在同步坐标  $Y$  轴上的投影  $i_{ty}$  即可调节有功功率,控制励磁电流在同步坐标  $X$  轴上的投影  $i_{tx}$ ,则可调节无功功率  $Q$ . 由于同步轴系上的励磁电流分量与实际的  $d, q$  轴励磁电流存在下述关系:

$$\begin{cases} i_{ty} = -i_{td} \sin \delta + i_{tq} \cos \delta \\ i_{tx} = i_{td} \cos \delta + i_{tq} \sin \delta \end{cases} \quad (6)$$

此时的转子位置角  $\delta$  与电磁功角  $\theta$  之间存在:  $\theta = \delta + \gamma - 90^\circ$ , 与传统同步机  $\delta = \theta$  不同, 改变  $\delta$  角及励磁电流  $i_{td}, i_{tq}$  的大小可以维持  $i_{ty}$  或  $i_{tx}$  不变, 从而实现有功和无功的独立调节.

这种通过控制励磁电流在同步坐标轴上的投影对有功、无功(电压)进行独立控制的方法就称为异步化控制. 在实际的励磁控制装置中, 对发电机有功、无(电压)的分别控制由具有有功、无功两个调节通道的调节器和可逆可控硅励磁装置来完成, 因此异步化励磁控制又称为双通道励磁控制. (关于双通道励磁控制器的专题讨论将在另外的文章中论述).

需要指出的是, 由于转子存在对称两相励磁绕组, 在转差  $s \neq 0$  时, 还可加对称两相交流励磁(励磁频率为  $s f_1$ ), 使电机运行于受控异步状态, 以一定转差稳定运行.

## 2 数学模型

为了通过仿真计算研究异步化汽轮发电机的运行特性, 需要导出其动态运行时的状态方程. 为便于分析, 仍采用同步旋转  $X, Y$  坐标系.

忽略定子电阻及定子侧电磁暂态过程, 并以转子电流为状态变量, 则可以推得, 同步旋转  $X, Y$  轴系下的电压方程为:

$$\begin{aligned} U &= X_{\Sigma} i_x + X_{st} i_{tx} + X_{st} i_{tx} \\ 0 &= X_{\Sigma} i_y + X_{st} i_{ty} + X_{st} i_{ty} \\ U_{ty} &= R_t i_{ty} + X_t p i_{ty} + X_{st} p i_{ty} + X_{st} p i_{ty} + S(X_{st} i_{tx} + X_t i_{tx} + X_{st} i_{tx}) \\ U_{tx} &= R_t i_{tx} + X_t p i_{tx} + X_{st} p i_{tx} + X_{st} p i_{tx} + S(X_{st} i_{ty} + X_t i_{ty} + X_{st} i_{ty}) \\ 0 &= R_D i_{Dq} + X_{Dp} i_{Dy} + X_{Dp} i_{Dy} + X_{st} p i_{ty} + S(X_{st} i_{tx} + X_{st} i_{tx} + X_{Dp} i_{Dx}) \\ 0 &= R_D i_{Dx} + X_{Dp} i_{Dx} + X_{Dp} p i_{tx} + X_{st} p i_{tx} + S(X_{st} i_{ty} + X_{st} i_{ty} + X_{Dp} i_{Dy}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $p = \frac{d}{dt}$  为微分算子;  $S$  为转差;

$R_r, R_D$  分别为转子励磁绕组和等效阻尼绕组的电阻;

$X_D = X_{ar} + X_{D\sigma}$  为等效阻尼绕组的电抗;

$X_{r\sigma}, X_{D\sigma}$  分别为励磁绕组和等效阻尼绕组的漏感抗。

由上式可得:

$$\begin{cases} i_x = (U - X_{ar}i_{rx} - X_{r\sigma}i_{rx}) / X_{\Sigma} \\ i_y = (-X_{ar}i_{ry} - X_{r\sigma}i_{ry}) / X_{\Sigma} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入(7)式的后四个方程,化简整理并考虑到  $S = p\delta$ ,则可得状态方程为:

$$\begin{bmatrix} X_r' & 0 & X_{ar}' & 0 \\ 0 & X_r' & 0 & X_{ar}' \\ X_{ar}' & 0 & X_D' & 0 \\ 0 & X_{ar}' & 0 & X_D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ry} \\ i_{rx} \\ i_{Dy} \\ i_{Dx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_r & -SX_r' & 0 & -SX_{ar}' \\ SX_r' & -R_r & SX_{ar}' & 0 \\ 0 & -SX_{ar}' & -R_D & -SX_D' \\ SX_{ar}' & 0 & SX_D' & -R_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ry} \\ i_{rx} \\ i_{Dy} \\ i_{Dx} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ry} - SX_{ar}U/X_{\Sigma} \\ U_{rx} \\ -SX_{ar}U/X_{\Sigma} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中  $X_r' = X_r - X_{ar}^2 / X_{\Sigma}$ ,  $X_{ar}' = X_{ar} - X_{ar}^2 / X_{\Sigma}$ ,  $X_D' = X_D - X_{ar}^2 / X_{\Sigma}$

设转子角速度为  $\omega_r$ ,假定转子速度高于同步速度时的转差  $S$  为正,同步速度为  $\omega_1$ , $\omega_r = (1 + S)\omega_1$ ,转子运动方程为:  $H \frac{d\omega_r}{dt} = \omega_1 H \frac{dS}{dt} = (T_m - T_e)$

当角速度的基值取同步旋转角速度,即  $\omega_b = 2\pi f_1$ ,时间的基值为  $1/\omega_b$  时,若转动惯量用弧度表示,转矩、功率均用标么值,则上式可简化为:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T_J} (T_m - T_e) = \frac{1}{T_J} (P_m - P_e) \quad (10)$$

取标么值时,转差  $S = p\delta$ ,转子运动方程的矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{S} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_J} (P_m - P_e) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

上式中,  $T_J$  为转子的时间常数;  $P_m$  为原动机的机械功率;电磁功率  $P_e$  用下式计算:

$$P_e = X_{ar}(i_x i_{ry} - i_y i_{rx}) + X_{ar}(i_x i_{Dy} - i_y i_{Dx}) \quad (12)$$

利用式(9)、(11)和式(12)就可用数值解法进行异步化汽轮发电机运行特性的仿真研究。

### 3 仿真结果及分析

仿真研究的系统模型如图1所示。异步化汽轮发电机的额定功率为200 MW,额定电压15750 V,系统电压330 kV,线路长150 km。电机及系统参数见表1。表中数据均为标么值,取发电机额定电压、额定视在功率为电压和功率的基值。

表 1 发电机及系统参数

$R_f$	$R_D$	$X_{d\prime}$	$X_e$	$X_{i0}$	$X_{D0}$	$X_T$	$X_C$	$X_L$	$T_J$
0.0022	0.0026	2.19	0.213	0.215	2.59	0.1	10.095	0.1295	2500

为了考察异步化汽轮发电机在不同无功运行状态下的有功、无功调节特性,假设发电机的初始运行状态分别为:发额定有功(标么值 0.85,取电机视在功率为基准值)、吸额定无功( $Q_s = -0.527$ )及发额定有功、额定无功( $Q_s = 0.527$ ).考察两种情况下发电机端有功  $P_e$ ,无功  $Q_s$ ,高压母线侧电压  $U_s$ ,转差  $S$ ,转子位置角  $\delta$  及转子励磁电流  $i_{fd}$  和  $i_{fD}$  的变化情况。

### 3.1 有功调节特性

稳态时的有功调节即在保持发电机高压母线侧电压不变( $U_s$  恒定)的情况下,调节发电机发出的有功功率。实际的有功调节过程是通过调节汽轮机的汽门开度来实现的,需要一定的时间。这里我们只考察励磁系统对发电机过渡过程的影响,因而在仿真计算时忽略调速器的时间常数。有功调节量由额定 0.85(标么值)调到 0.7,按原始状态运行 1 秒以后开始调节。仿真结果如图 3,图 4 和表 2 所示(表中数据除角度外均为标么值)。图中给出了调节过程中发电机的有功功率、变压器高压母线侧电压、励磁电流、转差及转子位置角  $\delta$  的变化曲线。表中数据为调节前后状态变量的初值和终值。以下各图中曲线的标尺分别为:对于  $P_e, i_{fd}, i_{fD}, U_s$  曲线,采用标么值,“1”表示标么值为 1;对  $\delta$  曲线,“1”表示角度  $180^\circ$ ;对  $S$  曲线,“1”表示转差为 0.01。

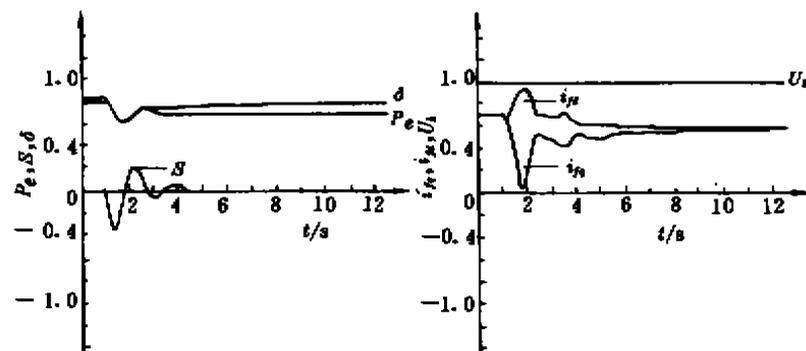


图 3 吸无功时的有功调节特性

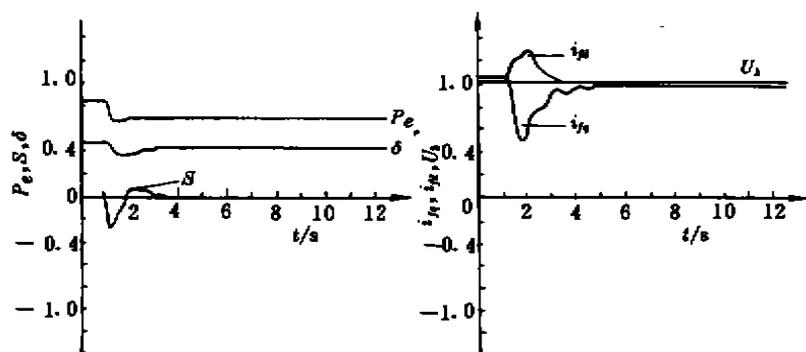


图 4 发无功时的有功调节特性

由图 3,图 4 及表 2 可知,保持高压母线侧电压不变时的有功调节具有下述特点:

- (1) 无论初始状态是吸无功还是发无功,发电机高压母线侧电压几乎没有波动;
- (2) 两种情况下的有功调节均能很快稳定(约 5 秒);
- (3) 对于不同的无功运行状态,发电机转子位置角  $\delta$  的变化方向和变化量不同,在发无功状态下调有功时  $\delta$  由  $86.2^\circ$  减小为  $80.7^\circ$ ,在吸无功状态下调有功时由  $143.2^\circ$  增大为  $144.6^\circ$ ,这是因为异步化汽轮发电机的有功、无功(电压)分别控制是由两个调节通道通过改变励磁电流和转子角位置来实现的,发电机的无功运行状态不同,励磁电流和转子角位置的变化也不同;
- (4) 过渡过程初期,转子两个绕组中的励磁电流急剧变化,随后由调节器有功通道的作用调平两个绕组中的励磁电流,并使转子角位置趋于稳定。

表 2 有功调节仿真结果

运行方式	吸无功额定运行						发无功额定运行					
状态量	$P_e$	$Q_e$	$U_b$	$\delta$	$i_{fd}$	$i_{fq}$	$P_e$	$Q_e$	$U_b$	$\delta$	$i_{fd}$	$i_{fq}$
初值	0.85	-0.527	0.983	143.2	0.7031	0.7031	0.85	0.527	1.019	86.2	1.0562	1.0562
终值	0.70	-0.561	0.983	144.6	0.5809	0.5809	0.70	0.492	1.019	80.7	0.9822	0.9822

3.2 电压调节特性

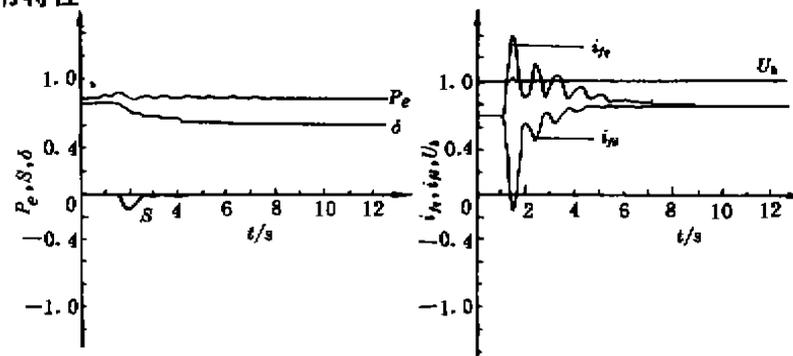


图 5 吸无功时的电压调节特性

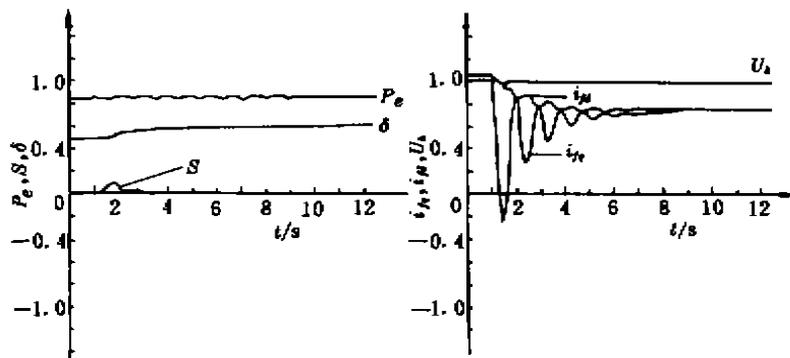


图 6 发无功时的电压调节特性

在线路传输的有功功率一定时,发电机的无功运行状态与线路各点的电压有关,因而调压实际上也就是调无功。我们假定需要调节的电压是电站升压变压器高压母线侧电压,希望能将该点的电压调节到额定值(标么值为 1)。要使  $U_b = 1$ ,当高压侧母线电压高于额定值时应减少励磁,而低于额定值时增加励磁,同时转子角位置将发生变化。本文的算例,吸无功额定运行时  $U_b = 0.983$ ,发无功额定运行时  $U_b = 1.019$ ,调压的仿真结果如图 5,图 6 和表 3

所示。

表 3 电压调节仿真结果

运行方式	吸无功额定运行						发无功额定运行					
状态量	$P_e$	$Q_e$	$U_b$	$\delta$	$i_{fd}$	$i_{f2}$	$P_e$	$Q_e$	$U_b$	$\delta$	$i_{fd}$	$i_{f2}$
初值	0.85	-0.527	0.983	143.2	0.7031	0.7031	0.85	0.527	1.019	86.2	1.0562	1.0562
终值	0.85	-0.089	1.000	110.7	0.7625	0.7625	0.85	-0.089	1.000	110.7	0.7625	0.7625

由图 5, 图 6 及表 3 可以看出, 发出的有功不变时, 异步化汽轮发电机的电压(无功)调节具有下述特点:

(1) 电压能很快达到设定值, 有功经过小的波动后回到初始值;

(2) 转子电流和转子角位置  $\delta$  均发生变化, 发无功时转子前移, 转子位置角  $\delta$  由  $86.2^\circ$  增大到  $110.7^\circ$ , 励磁电流减小, 而吸无功时转子后移,  $\delta$  由  $143.2^\circ$  减小到  $110.7^\circ$ , 励磁电流增大;

(3) 过流过程初期, 励磁电流迅速变化, 变化方向相反, 随后两个绕组中的励磁电流逐渐调平, 并使转子位置角  $\delta$  缓慢变化, 最后趋于稳定。

在上述有功、无功(电压)调节的过程中, 发电机两个绕组中的励磁电流最终总能相等, 使得长期运行时转子发热均衡, 并保证了异步化汽轮发电机的稳定运行。

分析以上仿真结果还可以看出异步化汽轮发电机有功、无功(电压)调节时均具有优良的调节性能。

## 4 结 论

对异步化汽轮发电机有功、无功调节特性的仿真研究可得出以下结论:

1) 无论在吸无功还是发无功状态下, 异步化汽轮发电机都能实现对有功功率和无功功率(电压)的独立调节, 并具有优良的调节性能。

2) 电压(无功)调节的电磁过程很快结束, 其后的机电过程是通过调平转子励磁电流改变有功功率来移动转子角位置。

3) 在有功、无功(电压)调节过程结束后, 转子两个绕组中的励磁电流总能相等, 保证了异步化汽轮发电机的长期稳定运行。

## 参 考 文 献

- 1 Лабунец Н А, Кохматов А П, Шакарян Ю Г. РЕЖИМЫ РАБОТЫ, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОНИЗНО-ОВАПНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ. Киев, Изд. АН УССР, 1987, 1~43
- 2 Лабунец Н А, Кохматов А П, Шакарян Ю Г. ПДР. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ТУРБО-ГЕНЕРАТОРАХ ПРИ АВАРИЯХ В СИСТЕМАХ ВОЗВУЖДЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ. Киев, Изд. АН УССР, 1987, 1~46
- 3 Лабунец Н А, Кохматов А П, Шакарян Ю Г. ПДР. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ. Киев, ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ АН УССР, 1989, 1~42
- 4 杨顺昌. 电机矩阵分析. 重庆: 重庆大学出版社, 1988, 81~90