

基于 MATLAB 的湖北电网次同步谐振分析

宋述波¹, 叶利², 余芳¹, 王 磊¹, 张国珍¹

(1. 武汉大学电力学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北电力试验研究院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 如何用一种通用的仿真工具来实时描述系统的灵活运行方式, 具有很强的移植性是仿真问题的关键所在。从这个角度出发分析湖北电网结构及其特点, 建立了用于研究次同步谐振问题的湖北电网简化模型, 并利用 MATLAB PSB 模块建立了电网次同步谐振的任意组态仿真模型。实际算例以冬季水电小发运行方式为计算水平, 研究了湖北电网的次同步谐振问题。从仿真结果可以看出 MATLAB 在分析次同步谐振问题时可以快速地得到谐振频率。

关键词: 次同步谐振; 仿真; MATLAB; PSB

中图分类号: TM743; TM71

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2002)12-0006-05

1 前言

在超高压远距离输电系统中采用串联电容补偿技术是提高输电线路传输能力和改善线路运行状况的一种经济而有效的方法。但是采用串联补偿后给电力系统运行带来一些新的问题, 其中之一是可能引发次同步谐振(Subsynchronous Resonance-SSR), 从而导致汽轮发电机组轴系扭振和低于正常系统频率的电气振荡。美国南部内华达州的 Mohave 火电站在 1970 年和 1971 年先后两次发生过这种严重事故, 并导致发电机转轴部分断裂^[1]。有关串联补偿技术引发的电力系统次同步谐振问题, 在国外已有相当深入的研究和认识, 并提出了许多防止次同步谐振的措施和对策, 比较典型的有励磁控制、静态滤波器、动态滤波器等。当输电线路串补度达到一定水平时, 必须采取防止次同步谐振的措施, 因此对这种防止措施的研究是一个非常重要的课题。本文将采用基于 MATLAB PSB 的仿真方法对电力系统的次同步谐振问题进行研究。

2 简化的电网模型

2.1 湖北电网的特点

2.1.1 电源

至 2000 年底, 湖北电网 6000 kW 及以上电厂装机容量 1432.42 万 kW, 其中水电 631.34 万 kW, 占 44.1%; 火电 801.08 万 kW, 占 55.9%。湖北电网内装机容量最大的火电厂为襄樊电厂、汉川电厂、阳逻电厂(装机均为 120 万 kW)。湖北电网内最大单机容量的火电机组为 30 万 kW(共 15 台)。鄂东负荷中心单机 20 万 kW 及以上的火电机组共 14 台。

2.1.2 主要输电网架

湖北电网已投运 500 kV 变电站 3 座, 500 kV 单相变压器 14 台, 变压器总容量为 256.8 万 kVA。500 kV 网络形成以“葛洲坝=双河=玉贤—凤凰山—葛洲坝”四边环网的主干架, 鄂东 500 kV 网络为“三线三变”结构, 三台联变受电功率极限为 180 万 kW。湖北电网存在 500 kV 与 220 kV 的电磁环网, 通过 500 kV 凤凰山两台联变、玉贤一台联变为鄂东 220 kV 联络线组成。同时湖北电网存在 220 kV 与 110 kV 的电磁环网结构, 表现在青山老厂、青山新厂外送以及黄石老厂和 220 kV 下陆、铁山变组成的供电网络。

2.2 化简的原则

保留系统中全部火电厂和 500 kV 变电站, 以及与 500 kV 变电站相联的全部线路。消去所有水电厂, 其主要原因是因为水轮机不易发生次同步谐振。用于研究次同步谐振的湖北电网简化的接线如图 1。

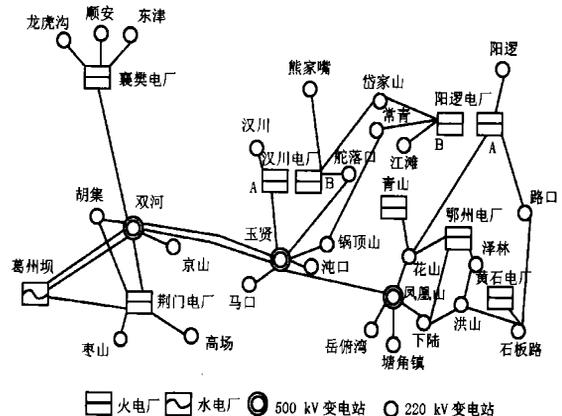


图 1 用于研究 SSR 的湖北电网简化接线图

Fig. 1 Simplified diagram of HuBei area for SSR

水轮机和电网之间没有相互作用的主要理由有^[2,3]:

(1) 发电机转子的惯量相对于水轮机转子和励磁机的惯量来说大得多,有效地保护了水轮机转子的机械系统。通过对发电机的扰动,难以激起扭转振荡。

(2) 水轮的粘滞阻尼,使得水轮机组扭转振荡的固有阻尼明显地高于汽轮发电机组。

3 设计思想

采用 MATLAB 编程的目的,不是给用户提供一个刚性环境,而是给用户提供一个可扩充的交互式工具(或环境)。这一交互环境给出一种具有任意组态性质的交互数据结构和组合命令(由各种 MATLAB 内置命令封装而成),用户利用这种柔性环境,不但能够设计与仿真各种复杂的系统,而且还可以进行一定程度的再开发,或者根据需要由基本命令构造出更复杂的电网结构和研究方法。

目前, MATLAB 在电力系统中的应用多停留在理论研究中,由它编写的实用化仿真工具却不多见。当今复杂控制领域的仿真工作有两个问题亟待解决:一是如何用一种通用的仿真工具来实时描述系统的灵活运行方式;二是如何使仿真软件具有工程实用价值,即对于各种运行环境具有很强的可移植性。本文从这两个角度出发,提出用 MATLAB 来实现复杂系统的任意组态,进而完成次同步谐振的仿真与分析。电网仿真结构如图 2 所示。

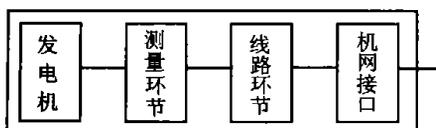


图 2 仿真模型结构图

Fig. 2 Structure of simulation model

MATLAB Power System Blockset (PSB) 是为电网的仿真开发出来的一种图形仿真程序包。传统的研究电力系统次同步谐振的方法主要是利用电磁暂态仿真程序 (EMTP)^[4] 或者是它的另外几种版本 alternative transient program (ATP) 和 electromagnetic transients for dc (EMTDC)。它们都是基于梯形积分无限逼近原则,采用定点算法,只有在系统中没有电力电子等非线性器件时才能产生高质量的结果,不能很好地适应于开关器件等引起的非连续性。而 MATLAB Simulink 中采用变时间变步长积分法,可以正确地模拟电力系统中开关与其它电力电子元件的特性。

4 模型与电网的状态空间描述

在 PSB 中电路的线性动态部分用连续时间状态方程表示。多输入多输出 N 阶线性系统输出向量通过状态变量的线性组合得到。在电路中电感电流和电容电压被选为状态变量,因为电力系统中的所有元件均可以由这两个基本量表示,总可以得到这样一个系统的状态空间表示。

4.1 旋转坐标系下的网络暂态方程

在单机系统中,各发电机的数学模型与简单系统中的数学模型无本质区别^[5],关键在于形成网络的暂态方程。次同步谐振分析中一般认为系统三相完全对称,即不存在零序分量,并且不考虑输电线路的分布参数特性,而将它处理为形集中参数等值电路。

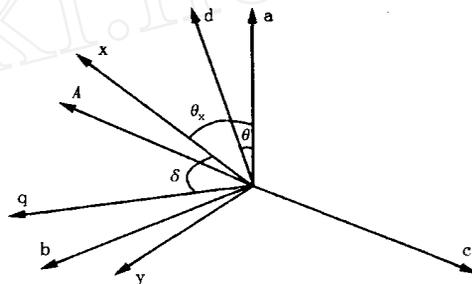


图 3 坐标转换示意图

Fig. 3 Sketch map of coordinate conversion

图 3 示出了 a, b, c 三相坐标系,某发电机转子 d, q 坐标系,系统同步旋转 x, y 坐标系之间的相互关系。其中 A 表示电压、电流或磁链,它的三相分量 d, q 分量和 x, y 分量分别用向量 $A_{abc} = [A_a, A_b, A_c]^T$, $A_{dq} = [A_d, A_q]^T$ 和 $A_{xy} = [A_x, A_y]^T$ 表示。除去零序分量而得,并可以将它们表示为:

$$J(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos & \cos(-2/3) & \cos(+2/3) \\ -\sin & -\sin(-2/3) & -\sin(+2/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A_{dq} = J(\theta) A_{abc}$$

$$Q(\theta) = \begin{bmatrix} \cos & -\sin \\ \cos(-2/3) & -\sin(-2/3) \\ \cos(+2/3) & -\sin(+2/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_{abc} = Q(\theta) A_{dq}$$

式(1)、(2)中 θ 为转子 d 轴与 a 相坐标轴间的角度,它对时间的导数为转子的转速 $\omega = p$ 。如果取 $\theta = \omega t$ 为 x 轴与 a 相轴间的角度,即令 $\theta = \omega t$, 则 $p = \omega$ 。对此可以写出 A_{abc} 与 A_{xy} 之间的关系式为:

$$\begin{cases} A_{xy} = J(x) A_{abc} \\ A_{abc} = Q(x) A_{xy} \end{cases} \quad (3)$$

且有 $J(x)Q(x) = I$ 。a、b、c 分量转换至 x、y 分量后的增量为：

$$[J(x)A_{abc}] = A_{xy} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可以导出 a、b、c 分量的导数转换至 x、y 坐标系后的增量为：

$$\begin{aligned} J(x)pA_{abc} &= J(x)p[Q(x)A_{xy}] = \\ J(x)[Q(x)pA_{xy} + pQ(x)A_{xy}] &= M_1 A_{xy} \end{aligned} \quad (5)$$

其中： $M_1 = \begin{bmatrix} p & -1 \\ 1 & p \end{bmatrix}$

式(5)的线性化方程为：

$$[J(x)pA_{abc}] = M_1 A_{xy} \quad (6)$$

x、y 分量与 d、q 分量间的关系可由坐标系之间的关系图得出：

$$A_{xy} = T_x A_{dq} \quad (7)$$

其中 $T_x = \begin{bmatrix} \sin & -\cos \\ \cos & \sin \end{bmatrix}$

式(7)线性化后为

$$A_{xy} = T_{x0} (A_{dq} - M_0 A_0) \quad (8)$$

其中： $T_{x0} = \begin{bmatrix} \sin & 0 & -\cos & 0 \\ \cos & 0 & \sin & 0 \end{bmatrix}$, $M_0 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$,

$$A_0 = \begin{bmatrix} A_{d0} \\ A_{q0} \end{bmatrix}。$$

5 基本元件模型

PSB 用来模拟电力系统与电气装置。用户可用的有 7 大组模型,分别是电源模型、线性与非线性无源元件、三相元件、连接装置、测量装置、电机模块以及电力电子装置。

电源包括交流电压、电流源,直流电压源以及受 Simulink 控制的电压、电流源。无源元件包括 R、L、C 串联支路,线性饱和变压器,分布参数线路和开关以及平波电抗器模型。三相元件包括许多由其它组的模块组合得来的元件,它们组成了构成其它三相元件系统的基本库。连接与测量装置是非常实用的模块,它们使不同系统之间的连接与接口变得非常容易。

5.1 x、y 坐标下网络元件的线性化暂态方程

5.1.1 电阻、电感串联耦合支路

图 4 示的电阻、电感串联耦合支路,在三相对称情况下有：

$$R i_{abc,jk} + Lp i_{abc,jk} = u_{abc,j} - u_{abc,k} \quad (9)$$

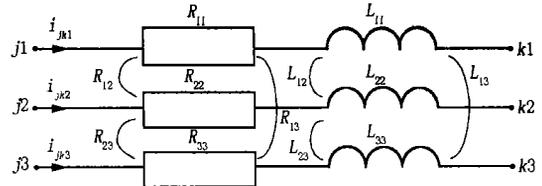


图 4 电阻、电感串联耦合电路

Fig. 4 Resistor and inductor in series circuit

$$\text{其中: } \begin{cases} R = \begin{bmatrix} R_s & R_m & R_m \\ R_m & R_s & R_m \\ R_m & R_m & R_s \end{bmatrix} = (R_s - R_m) I + R_m E \\ L = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix} = (L_s - L_m) I + L_m E \\ E = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{cases}$$

且有 $J(x)E = 0$ 。式中 R_s, R_m 和 L_s, L_m 分别为自、互电阻和自、互电感。因而 $R_s - R_m = R_1$ 和 $L_s - L_m = L_1$ 即分别为正序电阻和正序电感。转换至 x、y 坐标系的线性化方程为：

$$(R_1 I + L_1 M_1) i_{xy,jk} = u_{xy,j} - u_{xy,k} \quad (10)$$

式(10)可用于描述线路形集中参数等值电路中的不接地支路和变压器。如在其中令 j 或 k 点的电压为零,则对应于并联电抗器和用恒定阻抗模拟负荷的情况,改写成导纳形式的方程为：

$$i_{xy,jk} = (R_1 I + L_1 M_1)^{-1} (U_{xy,j} - U_{xy,k}) \quad (11)$$

5.1.2 电容耦合支路

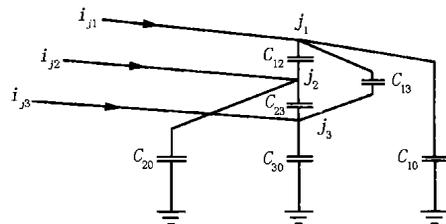


图 5 电容耦合电路

Fig. 5 Capacitance coupling circuit

在三相线路的形等值电路中有：

$$C dU_j(t)/dt = i_j(t) \quad (12)$$

在三相对称情况下暂态方程为：

$$i_{abc,j} = Cp u_{abc,j} \quad (13)$$

$$\text{其中: } C = \begin{bmatrix} C_s & C_m & C_m \\ C_m & C_s & C_m \\ C_m & C_m & C_s \end{bmatrix} = (C_s - C_m) I + C_m E$$

C 矩阵中的 C_s 和 C_m 分别为自、互电容。 $C_s - C_m = C_1$ 为正序电容。 x, y 坐标系下的线性化方程为:

$$i_{xy,j} = C_1 M_1 u_{xy,j} \quad (14)$$

5.2 串联补偿电容

设在节点 j, k 间装有串联补偿电容 C , 则其相应的方程式为:

$$i_{abc,jk} = Cp(u_{abc,j} - u_{abc,k}) \quad (15)$$

$$i_{xy,jk} = CM_1(u_{xy,j} - u_{xy,k}) \quad (16)$$

6 网络暂态方程

6.1 x, y 坐标系下的网络暂态方程

仿照潮流计算形成导纳矩阵的方法, 形成网络中各节点注入电流偏差与节点电压偏差之间关系的暂态方程为:

$$\begin{bmatrix} i_{xy,1} \\ \dots \\ i_{xy,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(p) & \dots & Y_{1n}(p) \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{m1}(p) & \dots & Y_{mn}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{xy,1} \\ \dots \\ u_{xy,n} \end{bmatrix} \quad (17)$$

6.2 发电机 d, q 坐标系下的网络暂态方程

将式(17)转换至各发电机 d, q 坐标系, 并化简得:

$$\begin{bmatrix} i_{dq,1} \\ \dots \\ i_{dq,n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_0 i_{dq,10} & 1 \\ \dots & \dots \\ M_0 i_{dq,m0} & n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(p) T_{x110} & \dots & Y_{1m}(p) T_{x1m0} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{m1}(p) T_{xm10} & \dots & Y_{mm}(p) T_{xmm0} \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} u_{dq,1} \\ \dots \\ u_{dq,n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_0 u_{dq,10} & 1 \\ \dots & \dots \\ M_0 u_{dq,m0} & n \end{bmatrix} \right\} \quad (18)$$

式(18)为转换至各发电机 d, q 坐标系后的网络暂态方程, 它包含变量 $i_{dq,1} - i_{dq,m}$ 、 $U_{dq,1} - U_{dq,m}$ 及 $1 - m$ 。化简可以得到

$$\begin{cases} Y_{ij}(p) T_{xij0} = T_{xi0}^{-1} Y_{ij}(p) T_{xj0} \\ T_{xij0} = \begin{bmatrix} i_{j0} \cos & -i_{j0} \sin \\ i_{j0} \sin & i_{j0} \cos \end{bmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

其中: $Y_{ij}(p)$ 为仅包含发电机节点的网络导纳矩阵, $i_{j0} = i_{j0} - i_{j0}$, ($i, j = 1, 2, \dots, m$) 为发电机 q 轴之间的相对角。

7 电网仿真及结果分析

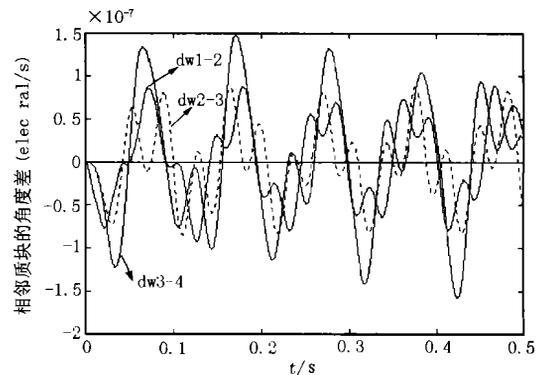
本文以 2002 年冬季水电小发运行方式为计算基准, 500 kV 母线典型潮流数据见表 1。

表 1 冬季水电小发典型潮流

Tab. 1 Power flow of winter season

电站名称	葛洲坝	凤凰山	玉贤	双河
有功/MW	3.9	6.8	5.8	6.9
无功/MW	1.3	2.4	0.8	2.1

考虑输电线路的实际长度, 本文选取襄樊电厂出线至双河线路为研究目标。在计及水电厂的影响时, 把水电厂的出力作为负值的负荷计入邻近的枢纽变电站。



注: 1-2 为高压缸与低压缸质块, 2-3 为低压缸 A 与低压缸 B 质块, 3-4 为低压缸 B 与发电机质块。

图 6 轴系角速度差

Fig. 6 Difference of shafting angle speed

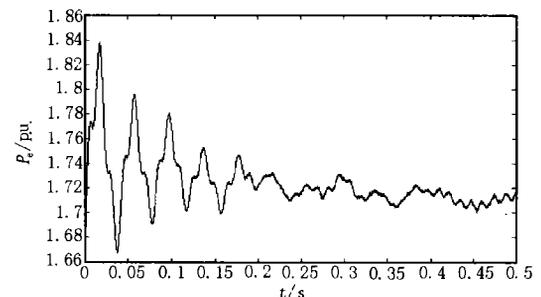


图 7 电磁转矩变化曲线

Fig. 7 Curve of electromagnetism torque's turning

图 6、7 为襄樊电厂至双河出线在串补度达到 57% 时, 发生谐振机组的转子轴系角速度差随时间变化曲线与谐振机组输出电磁转矩随时间变化曲线。在发生谐振后输出电磁功率剧烈振荡, 其最大幅值约为正常状况下的 1.8 倍, 其谐振频率为 19.7Hz。

8 结论

在利用 MATLAB 研究电网的次同步谐振问题时, 可以方便地模拟电网的任意状态, 使得电网不同状态下的分析变得非常容易。当电网的拓扑状态改

变时利用机网接口可以快速生成新的仿真模型。模型中发电机采用详细精度模型并计及了水电机组出力的影响。从仿真结果图可以方便地观察机组出力的变化及各个质量块之间的相互作用。而且能够直观地得到谐振的特征频率,使得复杂电网的次同步分析得到简化,速度得到提高。

参考文献:

- [1] 朱振青. 励磁控制与电力系统稳定[M]. 北京:水利电力出版社,1994.
- [2] Andersson G,Almuri R Rosenquist ,et al. Influence of Hydro Units ' Generator-to-Turbine Inertia Ratio on Damping of Sub-synchronous Oscillations [J] . IEEE Trans , 1984 , PAS 103 : 2352-2361.
- [3] Elts L E , Campbell E. Shaft Torsional Oscillations of Hydro generators[Z]. US Bureau of Reclamation Report REC-ERC-

79-6 ,Denver ,Colo. , 1979.

- [4] W Long ,et al. EMTP a powerful tool for analyzing power system transients[J] . IEEE Comput Appl Power ,1990 ,(3) :36 - 41.
- [5] 夏道止. 电力系统分析(下册)[M]. 北京:中国电力出版社,1995.

收稿日期: 2002-06-19

作者简介:

宋述波(1978 -),男,硕士研究生,研究方向为集群计算在电力系统中的应用;

叶利(1978 -),男,工程师,从事电力系统仿真的研究;

余芳(1979 -),女,硕士研究生,研究方向为检测技术在电力系统中的应用。

Analysis of Hubei power system s SSR based on MATLAB

SONG Shu-bo¹, YE Li², YU Fang¹, WANG Yang¹, ZHANG Guo-zhen¹

(1. Electrical Department of Wuhan University, Wuhan 430072 China)

(2. Hubei Electrical Test Academe, Wuhan 430072 China)

Abstract: How to describe system's estate at real time with a universal simulative tool is the key point of simulation. From this point we give an analysis on speciality of HuBei power system and use MATLAB PSB established imitate model of power system at randomly topologic. Paper give an analysis of HuBei power system's SSR with hydro-generation small in winter. It's very quick to get the syntonc frequency in use of MATLAB to analysis SSR.

Key words: subsynchronous resonance (SSR); simulation; MATLAB; PSB

当前电力工业发展的关键技术问题

在“十五”期间,按照“重点建设电网,积极发展水电,优化发展火电,适当发展核电,因地制宜发展新能源,高度重视环保,开发与节约并重,提高能源利用效率”的方针,电力工业将重点开展以下技术领域的研究:

(1) 研究全国联网技术,加速实施全国电网的互联,重点研究电网规划关键技术,大区电网交直流互联的关键技术和直流输电技术;(2) 更高一级电压的输电技术,重点研究 750 kV 和特高压的输电技术,包括高压和系统运行控制技术等,为全国联网和更高一级电压的选择以及大型能源基地的长距离大容量输电建设提供技术保障;(3) 研究电网稳定,经济运行技术,提高我国电网运行的安全水平,重点研究电网调频、调峰技术,系统稳定控制技术、电能质量控制技术、开发应用电力电子装置,研究提高 500 kV 输电线路输送能力的技术,积极开展可控串补技术,紧凑型输电线路等新技术的应用,进一步研究和推广应用输变电设备优化检修技术,电网可靠性评价技术,电网调压控制技术;(4) 研究电网商业化运营技术,为电力市场化改革提供先进可靠的技术手段,重点开发厂网分开,竞价上网的技术支持系统;(5) 研究电力系统自动化技术,提高电网运行的自动化水平,重点研究适合于互联网和电力市场环境下的调度自动化技术和配电自动化系统,先进的 500 kV 的变电站自动化系统;(6) 研究电力系统通信关键技术,加速电力通信的现代化步伐,重点研究电力通信网向宽带化、智能化和综合化方向发展的技术,电力通信网络管理技术,利用输电线路进行数据高速传输的技术,IP 网络在电力系统的应用技术,高速电力数据网络的组网技术,研究电力信息技术,重点开发电力企业信息管理平台,完善高速数据网络和电网调度自动化系统,基本建成电力系统的信息安全体系;(7) 研究电力营销技术,提高我国电力生产经济效益,重点研究适合我国国情的电力需求管理的相关技术,研究开发用电市场,研究电力营销领域中的电子商务技术;(8) 研究大型水力发电的建设和运行技术,加快我国水电资源的开发和利用;(9) 研究高参数、大容量火电机组和洁净煤发电的关键技术,提高我国机组制造和运行水平;(10) 研究发电厂监控和优化运行技术,状态检修技术,提高电厂的生产自动化水平和管理现代化水平;(11) 研究电力环保关键技术;(12) 研究核能和新能源发电技术,积极开发燃料电池、风力发电、太阳能发电等技术和设备。