

信息融合技术在电力系统故障检测中的应用探讨

曾祥君^{1,3,4}, K K Li², W L Chan², 尹项根³, 陈德树³, 林 干⁴

(1. 长沙电力学院 电力系, 湖南 长沙 410077; 2. 香港理工大学 电机系, 香港;
3. 华中科技大学 电气学院, 湖北 武汉 430074; 4. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 电力系统故障产生各种故障信息, 对故障信息全面分析、综合处理, 能提高故障检测的精度和鲁棒性。为实现对各种传感器检测到的多源故障信息进行有机综合处理, 需研究信息综合处理技术。信息融合技术是研究多源信息综合处理的新兴边缘学科, 已在军事、信息处理等领域中有着成熟的应用。该文把信息融合技术应用用于电力系统故障检测, 介绍信息融合故障检测的模型与方法; 分析信息融合技术在状态监测、继电保护中的应用技术; 并以小电流接地系统故障选线为例, 提出研究了模糊信息融合故障选线方法技术, 提高了故障选线的灵敏度和可靠性。

关键词: 信息融合; 电力系统; 故障检测; 继电保护

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1004-9649(2003)04-0008-05

0 引言

电气设备故障检测一直受到国内外专家的关注。大型发电机组、大型变压器、高压开关、电力线路等输变电设备往往装备有各种各样的传感器(包括电场、磁场、温度、压力、湿度、速度及化学成分检测等传感器), 采用各种物理的和化学的方法可实现电气设备的故障检测^[1,2]。受故障特性及传感器性能限制, 单一故障信息与故障间并不是一一对应的关系, 不同的故障可能产生同一故障信息, 不同的故障信息可能出自于同一故障。采用单一故障信息、单一故障检测方法往往难以满足故障检测的精度要求, 为提高故障检测的可靠性, 需要利用各种故障信息, 采用多种故障检测方法进行综合检测^[3-5]。但在基于多传感器的故障检测过程中, 考虑传感器误差及干扰影响, 各传感器测量结果往往难以统一, 甚至发生信息矛盾及信息熵增^[5]。传统基于多源故障信息的检测方法对各种不同传感器获得的信息进行孤立加工、简单累加, 不仅会导致信息处理工作量的增加, 且会割断各传感器测量信息间的有机联系而且会割断各传感器测量信息间的有机联系, 丢失信息有机组合蕴涵的大量故障特性, 造成信息资源的浪费, 影响故障检测精度和鲁棒性的提高^[5-7]。为实现对各种传感器检测到的多源信息及各种故障检测方法检测结果进行有

机综合处理, 需研究信息综合处理和分析技术。

信息融合技术是一门研究多源信息综合处理的边缘学科, 采用信息融合处理方法对多源信息进行互联、相关、估计及组合, 以实现对被测对象精确的和全面的描述^[5]。信息融合技术自 20 世纪 70 年代提出以来, 不断发展完善, 目前已成为信息处理领域的有力工具。但由于信息融合的早期研究主要集中于军事应用, 在很长时间内一直处于封闭状态。直到 20 世纪 80 年代后期随研究的深入和应用领域的扩大, 才被逐渐公开, 现在已成功应用于众多学科领域。我国自 20 世纪 90 年代初, 才掀起研究信息融合技术的热潮, 目前信息融合技术已在导航、自动目标识别、多目标跟踪、机器人、图像处理等领域得到广泛应用^[5-7]。近年来, 国际信息融合学会成立(www.infusion.org) 成立, 并创办了信息融合国际期刊 (Information Fusion), 将全面促进信息融合技术的推广应用。本文把信息融合技术应用用于电力系统故障检测, 对故障信息进行综合处理以提高故障检测的精度和鲁棒性, 并分析信息融合故障检测的模型与方法, 提出模糊多故障选线方法信息融合实现技术。

1 信息融合故障检测模型与方法

1.1 信息融合层次

从结构上看, 信息融合多源信息处理是多层次

收稿日期: 2002-02-18; 修回日期: 2003-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50207001); 湖南省自然科学基金资助项目(01JJY3025); 香港理工大学研究基金资助项目(A.PC.63)

作者简介: 曾祥君(1972-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 从事电力系统微机保护与控制的开发和研究工作。

的,通常可分为数据层、特征层和决策层^[3-5]。

数据层信息融合对传感器测量的数据进行筛选,滤除病态数据,进行初步的数据处理,判断是否有故障突变信号产生(如继电保护中的故障启动判断)。如果检测到故障突变信号,记录故障前后信息,以便进行特征层和决策层融合,完成故障诊断和故障隔离。

特征层信息融合是对数据层信息融合的结果和有关对诊断对象描述的诊断知识进行信息融合。诊断知识的来源既包括各种先验知识,如基于规则的知识、基于动态模型的知识、基于故障树的模型知识、基于神经网络的知识等,也包括通过数据挖掘系统得到的有关对象运行的新的知识,如规则、分类、分簇和序列匹配等。特征层信息融合对照已建立的假设(已知的故障模式),对观测量进行比较检验,以确定哪一个假设与观测量匹配,并进行故障诊断。

决策层信息融合是对特征层信息融合结果和对策知识进行信息融合,做出决策。根据决策层信息融合的决策结果,采取相应的故障隔离策略。

1.2 故障检测信息融合模型

信息融合的层次与故障检测的功能相对应:数据层信息融合对应于故障检测,特征层信息融合对应于故障诊断,决策层信息融合对应于故障隔离。通用的故障检测信息融合模型如图 1 所示:(1)从传感器(或分布式传感器系统)采集信息,一方面进行数据层的信息融合,实现故障检测、报警等初级诊断功能;另一方面存入数据库,进行数据采掘,提取故障特征量,用于深层次的信息融合处理;(2)对采掘到的各种故障特征量进行分类处理形成新的诊断知识,该知识与原有的诊断知识(各种先验知识)融合,形成对故障现象的系统描述,比较现有的故障现象与已知的故障模式产生故障诊断结果,完成特征层信息融合;(3)根据故障诊断知识及故障诊断结果复现故障,估计故障危害程度,结合各种故障特征量分析形成新的对策知识,该对策知识与原有的对策知识(各种故障处理经验)融合,形成故障处理方法,进

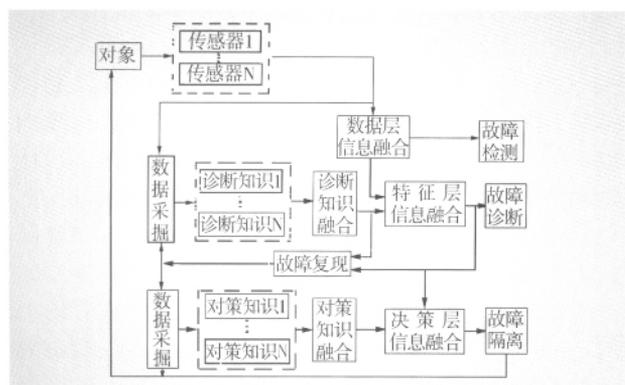


图 1 基于信息融合的故障检测系统结构示意图

行故障隔离,完成决策层信息融合。故障处理完成后,其典型案例仍是宝贵的经验,通过必要的数据采掘,形成先验诊断知识和先验对策知识,存入数据库。

1.3 信息融合方法

信息融合的方法很多,所有关于多源信息综合分析处理的技术都属于信息融合的范畴。常用的信息融合方法有:加权系数法、聚类分析法、D-S方法、表决法、人工神经网络、模糊认识模型、专家系统、基于小波变换的多尺度分析等^[5-7]。现对几种在故障检测技术中易于实现的常用信息融合方法进行介绍。

1.3.1 加权系数信息融合

加权系数信息融合是对多源信息进行融合的最简单方法,融合模型为:

$$Y = \sum_{k=1}^n r_k x_k, \quad 0 \leq r_k \leq 1 \quad (1)$$

式中, Y 为信息融合结果; x_k 为第 k 组信息的测量值; r_k 为第 k 组信息测量值的加权系数(由先验知识整定)。如果事先整定诊断阈值为 Y_0 ,则当 $Y > Y_0$ 时,判断有故障发生。

1.3.2 人工神经网络信息融合

信息融合可视为在一定条件下对多源信息空间的推理过程。即把多个传感器检测到的信息看作一个信息空间 M ,故障检测的输出信息作为另一空间 N ,多传感器信息融合技术实现从 M 到 N 映射的推理过程(表示为 $f: M \rightarrow N$)。多源信息的推理过程适合采用人工神经网络技术实现。神经网络具有很强的容错能力及自学习、自组织和自适应能力,能模拟复杂的非线性映射,并能对各种不同类型、不同量纲的数据进行综合分析处理,因此人工神经网络信息处理是一种较好的信息融合方法。

采用人工神经网络实现多源信息融合,首先要根据系统的要求及传感器的特点选择合适的神经网络模型(常见的神经网络模型有BP网络、Hopfield网络、ART网络、RBF网络等),然后再根据经验知识对神经网络模型进行离线学习,确定网络的联接权值和联接结构,最后把神经网络用于现场实现。在信息融合过程中,神经网络具有自学习和自组织能力,不断地从现场学习信息融合的新知识,调整自己的结构和权值,适应检测环境变化的故障检测要求,提高神经网络信息融合的精度和鲁棒性。

1.3.3 基于模糊推理的信息融合

在故障检测中,传感器所获取的信息或多或少地受到一些干扰因素的影响,具有一定的模糊性,适合采用模糊计算和推理方法进行信息融合处理。

多源信息的融合推理过程采用模糊变换和模糊推理表示:设 A 为多源信息(多传感器)的集合, B 为系统可能出现的决策集合, A 和 B 的关系矩阵为 $R_{A \times B}$ ($R_{A \times B}$ 的元素 μ_{ij} 表示由传感器 i 推断决策 j 的模糊结

果), X 表示各传感器判断的可信度矩阵, Y 表示模糊判断结果(Y 的元素 y_j 表示综合判断后的决策 j 出现的可能性),则模糊变换的推理过程表示为:

$$Y=X \cdot R_{A \rightarrow B} \quad (2)$$

比较 Y 中各元素,最大元素表示最可能出现的故障类型或最合适采用的故障隔离决策。

1.3.4 基于专家系统的信息融合

在信息融合过程中,有时需要利用先验知识及专家经验进行推理判断,适合采用专家系统进行信息综合分析处理。专家系统实际上是一组根据专家经验编写的计算机程序,能从大量的事实(来自传感器检测的故障特征信息)中,依照经验规则、启发性规则推导出决策方案。

1.3.5 利用小波变换的多尺度信息融合^[18]

通常电力系统故障检测只利用某一频带故障信息进行分析,可靠性较低。实际上,故障信息中含有丰富的高频分量,各种频段的信号是相互关联的,可采用小波分析在不同尺度下对故障信号中不同频段信息进行滤波、分离,然后对各频段的信息互联、相关和组合,进行信息融合,完成故障检测。小波分析故障检测能提高故障检测的精度、灵敏度和鲁棒性。

2 信息融合技术在电力系统故障检测中应用

2.1 信息融合在电力系统故障检测中应用分析

电力系统故障分为:对系统运行影响不大的绝缘老化性故障和影响系统运行的需马上隔离的短路性故障。前者由状态监测技术进行绝缘检测,后者由继电保护技术进行故障检测。

2.1.1 信息融合在状态监测中的应用状况

国内外针对不同的电力设备,已提出了众多状态监测方法,其中有许多通用方法,如振动分析法、油中气体分析法、局部放电监测法、恢复电压法等^[9,10]。各种状态监测方法有各自的适用范围和使用条件,不同状态监测方法的检测精度和鲁棒性一般不一样。由于绝缘老化性故障的故障特征不明显、故障变化量小,且检测量与故障特征间、故障特征与故障源间存在明显的非线性映射关系,仅依赖于单一故障信息的状态监测方法可靠性较差,难以满足现场运行要求。为提高状态监测的可靠性,通常把几种故障诊断方法进行综合考虑,采用模糊逻辑、神经网络、专家系统等信息处理技术,构造电力设备状态监测模型^[9,10]。随着故障诊断传感器的增多、测量的状态信息的增加及新型状态监测方法的涌现,对各种状态信息和各种状态监测方法的融合处理已成为电力设备状态监测的“瓶颈”。为此,需要研究高性能的信息融合软件,实现各种状态信息、各种故障诊断方法、各种信息处理方法的有机

融合,达到利用各种故障诊断方法的优点,克服各种方法的缺点,提高状态监测的可靠性和实用性。

2.1.2 信息融合在继电保护中的应用状况

由于继电保护实时性强,要求故障发生后瞬时动作;且继电保护动作对电力系统运行关系重大,电力系统运行对继电保护可靠性要求高。因此在计算机技术没有高度发展的条件下,不可能在故障瞬间对各种故障信息进行融合处理;同样在信息处理技术没有发展成熟的前提下,继电保护设计者也不放心把信息融合技术应用于继电保护领域。所以信息融合技术一直没有在继电保护领域得到广泛应用。

目前随继电保护装置硬件水平的提高(高性能CPU及DSP处理器应用于继电保护)及通信能力的增强,深层次的信息融合技术在继电保护装置中的实现已成为可能^[11-13]。继电保护中可能采用的信息融合技术包括:(1)综合多种继电器故障检测结果的加权系数信息融合;(2)综合多种故障检测方法的模糊信息融合;(3)综合处理各种故障信息的神经网络信息融合;(4)适应系统参数变化调整整定值的自适应信息融合。

在继电保护领域,数据层信息融合对应于AD采集数据的滤波处理及故障启动检测;特征层信息融合对应于故障启动处理,包括:正序、负序、零序、阻抗、导纳等故障特征量提取及分别进行的单个继电器的动作判断(如电流继电器、阻抗继电器、功率方向继电器等的计算与判断);决策层信息融合对应于对故障启动、继电器动作信号、闭锁信号、重合闸信号、系统参数及基于继电保护信息网络的其它控制信息进行联合处理,以决定采用何种方式对故障点进行隔离。

由于信息融合技术已在状态检测中得到了初步的应用,数据层信息融合和特征层信息融合方法已在继电保护技术中得到了较好的应用,并考虑到小电流接地系统故障选线对故障检测时间要求不严,适合采用多种故障检测方法融合处理实现,以下仅以故障选线为例对决策层信息融合技术进行探讨。

2.2 决策层信息融合技术在故障选线中的应用分析

配电线路接地故障,产生很多故障信息,包括:电压、电流、功率、线路对地导纳、线路对地阻尼率等。采用不同故障信息,可形成各种各样的接地故障检测方法^[14-19]。通常采用的故障检测方法有:(1)比较多条馈线零序电流大小和方向的故障线路检测。该方法根据零序电流分量的不同,又分为:零序基波电流故障线路检测、零序谐波电流故障检测、零序暂态电流故障检测^[14,15]。(2)利用零序电压电流方向关系信息的零序功率方向接地故障检测^[14]。(3)利用故障线路与非故障线路间零序能量关系信息的零序能量接地故障检测^[16]。(4)借鉴距离保护思想,基于零

序电压、零序电流的大小和方向关系进行信息融合的零序导纳方向接地故障检测^[17]。(5)基于负序信息的负序电流大小、方向接地故障检测^[17,18]。(6)基于测量线路对地阻抗、阻尼率等信息的注入信号谐振测量的接地故障检测^[19,20]。

以上方法有各自的优点和缺点,在不同的系统、不同的故障条件下,各种方法的检测精度不一样。由于小电流接地系统接地故障电流小,故障检测困难,单一的一种故障检测方法难以满足现场运行的要求,有必要对各种接地故障检测方法进行融合处理,利用各种方法的优势,弥补各自的缺点,以提高故障检测精度。信息融合的方法有很多,适应上述各种接地故障检测方法的特点,在此对基于模糊专家系统接地故障检测方法进行探讨。

2.2.1 模糊故障选线的基本思想

常规故障选线的输出结果:要么故障、要么不故障,如果用 1 代表故障、0 代表不故障,则故障选线输出取 {0,1} 中的值。模糊故障选线的基本思想^[8]:把故障选线中的绝对隶属关系灵活化,使元素对集合的隶属度从原来只能取 {0,1} 中的值扩充到可取 [0,1] 区间中的任一数值,用隶属函数表示各故障选线方法输出的不确定性,然后进行模糊逻辑运算,得出综合的故障选线模糊结果,再进行清晰化处理,得到最终的故障或者非故障的判断结果。

2.2.2 隶属度函数的选取

任意故障选线方法 i 的隶属函数 μ_i 可选取为:正态函数、三角函数、梯形函数、S 形函数及折线等等。如图 2 所示,选择折线形隶属度函数,其中 S 为通常故障选线的动作整定值, S_L 为故障条件下动作量可能出现的下限值, S_H 为非故障条件下动作量可能出现的上限值。在 $[S_L, S_H]$ 区间,单个故障选线方法的动作是不可靠,通常定义该区域为模糊区,采用模糊隶属度描述该区间故障选线的可能动作情况。

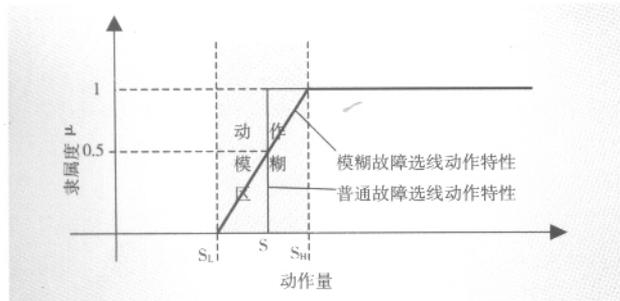


图 2 一种故障选线方法动作的隶属度函数

2.2.3 多故障选线方法之间的模糊信息融合

模糊信息融合的计算方法很多,适应接地故障选线的特点,通常取加法运算^[8]。采用各故障选线方法对故障决策的隶属度与该故障选线方法观察值对故障决策的支持程度(模糊可信度系数)之积的和作

为故障决策总的可信度。如根据专家经验,取故障选线方法 i 的模糊可信度系数为 K_i (取值范围为 0~1),进行加法运算, n 个故障选线方法信息融合输出为:

$$Y = \sum_{i=1}^n K_i \mu_i \quad (3)$$

对信息融合输出结果进行清晰化处理:根据模糊规则,转换为实际输出判断(故障或者非故障)。如: $Y \geq 0.5$, 该配电线路发生接地故障; $Y < 0.5$, 该配电线路不发生接地故障。整个信息融合的过程如图 3 所示。

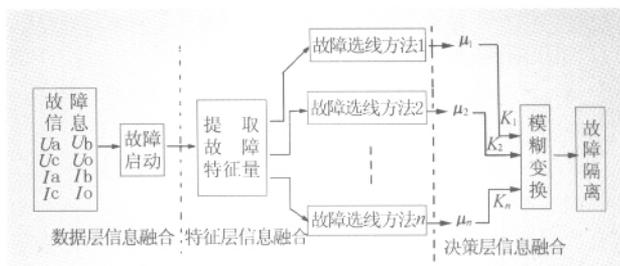


图 3 基于模糊专家系统的接地故障检测方法

2.2.4 模糊专家系统数据库的建立^[8]

为提高接地故障检测的自适应性,建立模糊专家系统数据库,即根据不同的中心点接地方式、不同的补偿度、不同的系统电容电流、不同的故障性质等对不同的故障选线方法选择不同的模糊可信度系数 K_i 。

3 结论

电力系统故障产生各种故障信息,对多源故障信息全面分析综合处理已成为故障检测的“瓶颈”。信息融合技术是研究多源信息处理分析方法的新兴边缘学科,已在军事、信息处理等领域中有着成熟的应用。本文提出了信息融合故障检测的模型和方法,分析了信息融合技术在状态监测、继电保护中的应用状况,并以小电流接地系统故障选线为例,提出模糊信息融合故障选线方法,以望进一步提高故障选线的可靠性。目前信息融合技术在电力系统中的应用尚处于自发的初级阶段,随故障检测装置信息处理能力的提高,信息融合技术将全面应用于电力系统故障检测,综合分析处理多源故障信息,提高故障检测的精度和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 伍行健. 故障信息的识别与处理[D]. 武汉: 华中理工大学, 1999.
- [2] 张雨, 温熙森. 设备故障信息融合问题的思考[J]. 长沙交通学院学报, 1999, 15(2): 22-29.
- [3] 郁文贤, 雍少为. 多传感器信息融合技术评述[J]. 国防科技大学

- 学报,1994,16(3):1-11.
- [4] 张彦铎,姜兴渭. 多传感器信息融合及在智能故障诊断中的应用[J]. 传感器技术,1999,18(2):18-22.
- [5] 刘同明,夏祖勋,解洪成. 数据融合技术及其应用[M],北京:国防工业出版社,1998.
- [6] Richard T Antony. Principle of Data Fusion Automation[M]. London: Artech House, 1995.
- [7] Varshney, Prmod K. Distributed detection and data fusion[M], New York: Springer, 1997.
- [8] 曾祥君. 电力线路故障检测与定位新原理及其信息融合实现研究[D]. 武汉:华中理工大学,2000.
- [9] 许婧,王晶,高峰,等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术,2000,24(8):48-52.
- [10] 关根志,贺景亮. 电气设备的绝缘在线监测与状态维修[J]. 中国电力,2000,33(3):46-50.
- [11] 葛耀中. 自适应继电保护及其前景展望[J]. 电力系统自动化,1997,21(9):42-46.
- [12] 贺家李. 电力系统继电保护技术的现状与发展[J]. 中国电力,1999,32(10):38-40.
- [13] 王明俊. 继电保护中的信息技术[J]. 电网技术,1999,23(1):1-3,8.
- [14] D Griffel, Y Harmand. A new deal for safety and quality on MV networks[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1428-1433.
- [15] 刘凯,吴希再. 一种小电流系统单相接地故障选线新方法[J]. 华中理工大学学报,1997,25(12):66-68.
- [16] 何奔腾,胡为进. 能量法小电流系统选线原理[J]. 浙江大学学报,1998,32(7):451-457.
- [17] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 零序导纳馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):20-26.
- [18] 曾祥君,尹项根,张哲,等. 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):78-84.
- [19] 曾祥君,尹项根,于永源,等. 基于注入变频信号的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法[J]. 中国电机工程学报,2000,20(1):29-32.
- [20] ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu. A novel technique for measuring grounding capacitance and ground fault resistance in ineffectively grounded systems [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000,20(5):72-73.

(责任编辑 张重实)

Discussion on application of information fusion techniques in electric power system fault detection

ZENG Xiang-jun^{1,3,4}, K K Li², W L Chan², YIN Xiang-gen³, CHEN De-shu³, LIN Gan⁴

(1. Dept. of Electrical Engineering, Changsha University of Electric Power, Changsha 410077, China; 2. Dept. of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Dept. of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: Much fault information is produced by electric power system faults. Integrating and processing all fault information can improve the precision and robustness of fault detection. Information fusion technique is a new built-up subject in studying for multi-sources information integrating and processing, and is introduced and applied in electric power system fault detection in this paper. The models and methods for information fusion technique in power system fault detection are presented. The techniques for information fusion application in condition monitoring and protective relaying are analyzed. And the case of information fusion based earth faulty feeder detection for indirect grounded system is developed, which has high sensitive and reliability to detect high impedance ground faults.

Key words: information fusion; electric power system; fault detection; protection relaying

国内科技信息

▲ **深化电力体制改革: 中国将建3级电力市场体系** 国家电网公司2003年工作会议透露,2003年中国将以合理的电价机制为核心,通过深化电力体制改革,构建起省级、区域级和国家级3级电力市场体系。

建立完善的3级电力市场的关键是各级电力市场必须在准确定位、责

权明晰的基础上优化市场结构,并依据各自的功能统一协调发展。

省级电力市场是省级区域范围资源优化配置的基础性市场和直接面向广大用户的供电市场,因此要规范统一、健全机制,并通过全面开放带动竞争、促进市场良性发展;区域电力市场是跨省区资源优化配置的载体,只有打破各省间的壁垒,才会使市场交易规模不断扩大;国家级电力市场是按照国家宏观调控的要求、保持国家控

制力的重要手段,是实施西电东送、南北互供的重要载体,也是提高全国电网整体经济效益的基础。

由于电网是电力市场的基础和载体,因此要发挥大电网在资源优化配置中的优越性和基础性作用,逐步形成以区域资源配置为基础的全国范围内资源优化配置的大市场。通过深化电力体制改革,构建政府监管下的政企分开、公平竞争、开放有序、健康发展的电力市场体系。