

# 并网风电出力平稳控制方法综述

禹化然<sup>1,2</sup>, 蒋伟毅<sup>1</sup>, 邱生<sup>1</sup>

(1. 江苏苏州供电公司, 江苏 苏州 215004; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 风电以其清洁无污染、环境友好、技术成熟等优势, 成为电力系统发展的热点。为有效利用风能, 大规模风电场必须实现并网运行, 但风电输出功率具有波动性和随机性, 会对接入电网的稳定性和电能质量等方面造成不利影响, 制约了风电的快速发展。针对如何改善风电出力波动对接入电网影响问题, 分析了风电接入对电网的影响, 对现有风电场出力的平稳控制方法进行了总结, 提出了有待进一步研究的方向。研究表明; 风电场装设无功补偿装置、采用储能技术或者和其他分布式电源组成微电网, 可有效平稳风电出力的波动, 改善对接入电网的影响。

**关键词:** 并网风电场; 平稳控制; 无功补偿; 储能技术; 微网

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)01-0008-06

## Survey on approaches to smooth output of shunt-connected wind farm

YU Hua-ran<sup>1,2</sup>, JIANG Wei-yi<sup>1</sup>, QIU Sheng<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Wind power has been the hot spot in the development of power systems, because it has following advantages: clean, kind to the environment, technique-matured and so on. In order to utilize the wind power effectively, the large wind farms must be connected with the power system. But the output of wind farm is fluctuant and random, so it can do harm to the stability and power quality of the power system, which becomes a bottleneck of developing the wind power quickly. Aiming at the impacts on the power system brought by the fluctuation of wind power output, the effects on power system of shunt-connected wind farm were analyzed. The existing control methods of smoothing the wind power output were summarized and the future research was pointed out. The result indicates that installing reactive power compensation devices or adopting energy storage devices in wind farms or making up microgrid with other distributed generations are effective approaches to smooth the output of wind farm and reduce the impacts on power system integration.

**Key words:** shunt-connected wind farm; smooth output of wind farms; reactive power compensation; energy storage; microgrid

## 0 引 言

风力发电具有清洁无污染、技术成熟、全球可行的特点, 并且具有超过 20 年的良好运行记录, 越来越被人们所认可, 成为电力系统中相对增长最快的能源。近年来, 风力发电在技术上日趋成熟, 商业化应用水平不断提高; 同时, 风力发电的成本也在不断降低, 这为充分利用风能提供了诸多有利条件。

为了有效利用风能, 大规模风力发电必须实现并

网运行。然而, 风电出力波动大且风电场离负荷中心较远, 给风电接入电网的运行带来许多不利影响, 而且随着并网风电场的容量越来越大, 对电网的影响也越来越明显。如何平稳控制风电场的出力, 改善并网风电场对电力系统的影响, 正成为新的研究热点, 引起人们的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。

本研究分析并网风电场出力的波动性和随机性对接入电网的影响, 并对现有风电场出力的平稳控制方法进行总结。

收稿日期: 2011-08-05

作者简介: 禹化然(1984-), 男, 山东泰安人, 主要从事变电检修方面的研究工作. E-mail: yuhuaran@gmail.com

## 1 并网风电场的不平稳出力对接入电网的影响

风力发电原动力是不可控的,它的出力大小决定于风速的状况。风资源的不确定性和风电机组本身的运行特性,使得风电机组的输出功率具有波动性和随机性。从电网的角度看,并网运行的风电机组相当于一个具有随机性的扰动源,会对电网的频率、稳定性、电能质量等方面造成影响<sup>[6-11]</sup>。

### 1.1 对电网频率的影响

风电场对电网频率的影响取决于风电场容量占电网总容量的比例。当风电容量在电网中所占的比例较大时,其输出功率的随机性和波动性对电网频率的影响显著,影响电网的电能质量和一些对频率敏感负荷的正常工作。考虑到风电的不稳定性,当风电由于停风或大失速而失去出力后,会使电网频率降低,特别是当风电比重较大时,会影响到接入电网的频率稳定性。当然,当电网较大、联系紧密时,频率问题不显著。

### 1.2 对电网稳定性的影响

风力发电系统通常接入电网的末端,改变了配电网功率单向流动的特点,使潮流流向和分布发生改变,这在原有电网的规划和设计时是没有预先考虑的。当风电注入功率增大时,风电场附近局部电网的电压和联络线功率可能会超出安全范围,严重时会导致电压崩溃。

在异步发电机并网系统中,风电系统在向电网注入功率的同时需要从电网吸收大量的无功功率。因此,为了补偿风电场的无功功率,每台风力发电机都配有功率因数校正装置,目前常用的是分组投切的并联电容器。电容器的无功补偿量的大小与接入点电压的平方成正比,当系统电压水平较低时,并联电容器的无功补偿量迅速下降,导致风电场对电网的无功需求上升,进一步恶化电压水平,严重时会造成电压崩溃。

由于异步发电机具有功率恢复特性,当电网发生短路故障时,若故障排除不及时,也将容易导致暂态电压失稳。另外,随着风电场规模的不断扩大,风电场在系统中所占的比例不断增加,风电输出的不稳定性对电网的功率冲击效应也不断增大,对系统稳定性的影响就更加显著,严重情况下,将会使系统失去动态稳定性,导致整个系统瓦解。

### 1.3 对电能质量的影响

电压波动和闪变是风力发电机组对电网电能质量

的主要负面影响之一。引起电压波动和闪变的因素很多,如风速、风电机组类型、控制系统以及风电机组公共连接点的短路容量、电网线路 $X/R$ 比和公共连接点所连的负荷特性等。风速尤其是平均风速和湍流强度对电网波动和闪变影响很大。随着风速的增大,风电机组产生的电压波动和闪变也不断增大。湍流强度对电压波动和闪变的影响几乎成正比例增长。并网风电机组类型和控制系统对风电机组的电能质量影响很大。变速风电机组运行产生的电压波动和闪变水平远低于恒速风电机组,几乎是恒速风电机组的 $1/4$ 。

### 1.4 对保护装置的影响

为了减少风电机组的频繁投切对接触器造成的损害,在有风期间风电机组都保持与电网相连,当风速在起动风速附近变化时,允许风电机组短时电动机运行。因此,风电场与电网之间联络线的功率流向有时是双向的,风电场继电保护装置的配置和整定应充分考虑到这种运行方式。异步发电机在发生近距离三相短路故障时不能提供持续的故障电流,在不对称故障时提供的短路电流也非常有限。风电场保护在于如何根据有限的故障电流来检测故障的发生,使保护装置准确而快速地动作。另一方面,尽管风力发电提供的故障电流非常有限,但也有可能会影响现有配电网保护装置的正确运行。

### 1.5 风电场对电力系统运行成本的影响

风力发电的运行成本很低,与火电机组相比可以忽略不计。但是,风力发电是一种间歇性能源,风电场的功率输出具有很强的随机性,目前的预报水平还不能满足电力系统实际运行的需要,在作运行计划时风电是作为未知因素考虑的。为了保证风电并网以后系统运行的可靠性,因此需要在原来运行方式的基础上,额外安排一定容量的旋转备用以响应风电场发电功率的随机波动,维持电力系统的功率平衡与稳定。可见风电并网对整个电力系统具有双重影响:一方面分担了传统机组的部分负荷,降低了电力系统的燃料成本;另一方面又增加了电力系统的可靠性成本。

## 2 平稳风电场出力的措施

为了降低风电场出力的波动性和随机性对接入电网的影响,必须采取一定的措施来平稳风电场的出力,常用的风电场出力平稳控制措施有:接入无功补偿装置、采用储能技术及风电场和其他分布式发电一起组成微电网。

### 2.1 无功补偿装置

通过装设无功补偿装置可有效减小风力发电功率波动对电网电压的影响。目前大部分的风电机机端都带有并联电容组,可根据其输出的功率大小进行自动投切,保证风电场在一定的功率因数(一般为 0.97 ~ 1.00)下运行。随着现代电力电子技术的发展,利用静止无功补偿器(SVC)、静止无功系统(SVS)、静止无功发生器(SVG)及静止同步补偿器(STATCOM)来改善电压质量和提高系统的稳定性已获得广泛的应用。

文献[12]研究 SVC 在风电并网过程中的应用,以某地区多个风电场接入本地电网为背景,分析在重要负荷点安装 SVC 的效果。仿真结果表明,SVC 能改善不同风电场出力情况下系统电压质量,提高风电送出能力和电网暂态电压稳定性。

文献[13]利用 SVC 作为并网型风力发电系统的无功补偿装置,无功补偿装置的控制部分采用具有高速处理能力的 DSP,补偿导纳值基于瞬时无功功率理论进行计算。该补偿装置具有结构简单、控制方便及响应速度快等特点,可有效稳定并网风力发电系统电压。

文献[14]在电力系统仿真软件 DigSILENT/Power-Factory 中建立了 SVC 补偿型定速风电机组的模型,分析了其稳态和暂态特性以及由 SVC 补偿型风电机组组成的风电场对电网的影响,分别采用上述风电机组模型和用电容器组进行补偿的普通定速风电机组模型进行仿真实验,比较结果表明 SVC 补偿型风电机组具有快速调节无功功率的能力,当系统故障时,该风电机组可快速恢复系统电压,且风电机组启动过程对系统的冲击较小。

文献[15]给出了一种新型的基于直流侧电容电压控制和系统无功电流反馈控制的算法对 STATCOM 实行控制,以渐变、随机和阵风这 3 种风速情况为例,对 STATCOM 的补偿特性进行了仿真分析。仿真结果表明,STATCOM 在补偿过程中能迅速、稳定地跟踪无功的变化,并且补偿时无明显的冲击电压和电流。

文献[16]研究了用 STATCOM 改善基于定转速风电机组和基于转子电阻可调的绕线式发电机风电场的暂态电压稳定性。并在 DigSILENT/PowerFactory 中建立了定转速风电机组及转子电阻可调风电机组的模型和 STATCOM 控制模型,通过包含风电场的电力系统仿真,验证了 STATCOM 对基于定转速风电机组和带有可变转子电阻控制的风电机组风电场暂态电压稳定性的贡献。

文献[17]在同步旋转坐标系下,采用 STATCOM

和异步发电机风力发电系统的暂态数学模型,采用基于非线性反馈线性化的逆系统方法,构造出 STATCOM 的伪线性系统,然后采用滑模变结构控制理论设计出 STATCOM 的滑模变结构控制器。

### 2.2 储能技术

风电场出口加装储能装置(如图 1 所示)可以在高风速时储存能量,低风速时释放能量,实现风电机组输出有功功率和无功功率的综合快速补偿,在风速快速扰动的情況下平滑了风电场的输出,从而降低了风波动对电网的冲击,有效提高了电网的电能质量和并网风电机组自身的稳定性<sup>[18]</sup>。储能技术可分为:物理储能、电磁储能、电化学储能和相变储能 4 类。储能装置的种类如图 2 所示。储能技术功率等级及其技术成熟度如图 3 所示。风电场常用的储能技术为:物理储能、电磁储能和电化学储能,相变储能仍处于研究之中。

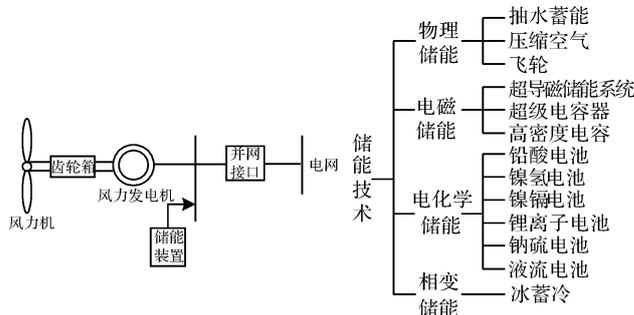


图 1 采用储能装置的风力发电系统 图 2 储能技术的种类

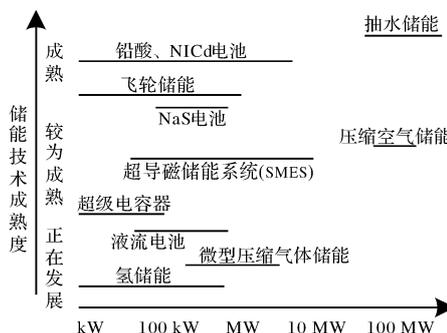


图 3 储能技术功率等级及其技术成熟度

#### 2.2.1 物理储能

由于受制于地理位置和自然环境的限制,风力资源富集区水资源比较短缺,而海水有腐蚀性不易存储,抽水蓄能在风电中极少应用。目前在风电中应用最多的物理储能技术是压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)和飞轮储能(fly-wheel energy storage, FES)。

文献[19]采用飞轮储能单元作为并网风电场的能量缓冲装置,以稳定并网风电场的功率输出,建立了

基于等效电路的飞轮储能系统的数学模型,并设计了以风力发电机输出有功功率和无功功率作为控制信号时的控制策略。

文献[20]提出了一种采用飞轮储能电池来充当能量储存器和电能质量调节器的独立运行式风力发电系统,分析了飞轮储能电池的储能和调节电能质量的作用,详细分析了直流侧电压的调节方法,并给出了控制方法。

文献[21]针对于风力发电和飞轮储能联合系统,提出了“采用模糊神经网络控制算法实现直流总线电压的自动调整,达到稳定系统的直流总线电压”的目的。仿真和实验结果证明,在风力发电和飞轮储能联合系统的能量控制过程中使用模糊神经网络控制算法实现了能量的快速存储和释放,起到了稳定系统电压的作用,取得了满意的控制效果。

文献[22]从技术和经济方面对现有的储能方式进行了分析。文献作者先从技术角度选择合适的储能方式,然后对其进行经济分析,结果表明风电储能易采用 CAES 和电池。

文献[23]介绍了德国电网和风电的发展情况,提出了在风电场装设 CAES 改善风电场的出力,从而使风电场从电网角度看可作为一个普通的电场。

文献[24]从随机动能机械转换利用的角度,提出了一种基于压缩空气储能的小规模利用风力发电新技术,这种新技术能扩大风能的利用范围,提高其能量转换效率,降低风能开发和转化的成本。

### 2.2.2 电磁储能

电磁储能包括超导、超级电容器和高密度电容,在风电场中应用超导储能最为常见。

文献[25]考虑将超级电容器并入双馈异步发电机设计中,不仅能平稳由风力引起的功率波动,还有利于瞬变过程中直流母线电压的稳定,从而提高它的低电压穿越能力。

文献[26]建立了含 SMES 的单机无穷大系统的 Phillips-Hoffman 模型,导出了含 SMES 电力系统总的电磁转矩表达式,从理论上分析了 SMES 对增强系统阻尼的作用。

文献[27]建立了风电机组和超导储能(SMES)装置的数学模型,以研究 SMES 对并网风电场运行稳定性的改善。针对风电系统中经常出现的联络线短路故障和风电场的风速扰动,提出了利用 SMES 安装点的电压偏差作为 SMES 有功控制器的控制信号的策略。

文献[28]提出使用超导储能 SMES 单元使风力发电机组输出的电压和频率稳定,详细介绍了 SMES 的

调节原理及其最优控制方法,建立了 SMES 模型和加入 SMES 后系统的线性化仿真模型。

### 2.2.3 电化学储能

电池技术和电力电子技术的发展促进了电池储能系统(battery energy storage system, BESS)在电力系统中的应用,将 BESS 与风力发电单元相结合,有利于减少风电场输出波动对电网的影响,改善并网风电场的稳定性问题。

文献[29]以随机风和电网大扰动为例,采用电池储能系统对并网风电场的电能质量和稳定性问题进行仿真。结果表明,采用该控制策略的电池储能系统可很好地改善并网风电场的电能质量和稳定性。

文献[30]概述了钒电池储能系统(VESS)的发展历程及其研究现状,列举了国外 VESS 在不同场合的应用;简要介绍了我国的钒电池研究现状,分析了钒电池对钒资源的需求,指出 VESS 的大规模推广将会大力促进我国对可再生能源的利用,优化钒资源的综合利用。

文献[31]根据风能和太阳能发电系统的特殊性及其对储能装置的要求,比较了密封铅蓄电池、镍镉电池、镍金属氢化物电池、锂离子电池的长处和短处;同时还列出了胶体密封铅蓄电池的应用实例。指出胶体密封铅蓄电池是风能和太阳能发电系统的最合适的储能装置;钠硫电池、氧化还原电池和超级电容器有待进一步开发研究。

## 2.3 微电网

为了降低风电出力波动对电网带来的不利影响,同时发挥风电积极的辅助作用,一个较好的解决方法就是把风电场和其他分布式电源以及负荷、储能装置一起组成微电网,作为一个单独的集成系统运行。

微电网从系统观点看,将发电机、负荷、储能装置及控制装置等结合,形成一个单一可控的单元,同时向用户供给电能和热能,如图 4 所示。微电网既可与大电网联网运行,也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行。它具有双重角色:对于公用电力企业,微电网可视为电力系统一个简单的可调度负荷,可以在数秒内做出响应以满足传输系统的需要;对于用户,微电网可以作为一个可定制电源,以满足用户多样化的需求。由于微电网灵活的可调度性且可适时向大电网提供有力支撑,学者形象地称之为电力系统的“好市民”(good citizen)和“模范市民”(model citizen)。此外,紧紧围绕全系统能量需求的设计理念和向用户提供多样化电能质量的供电理念是微电网的 2 个重要特征。在接入问题上,微电网的入网标准只针对微电网与大电网的公共连接点(PCC),而不针对各个具体

的微电源。微电网不仅解决了分布式电源的大规模接入问题,充分发挥了分布式电源的各项优势,还为用户带来了其他多方面的效益<sup>[32-37]</sup>。

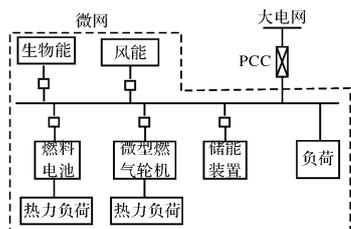


图4 微电网示意图

微电网作为单一大电网的有益补充,其广泛应用的潜力巨大。目前,世界上一些主要发达国家和地区,如美国、欧盟、日本和加拿大等,都开展了对微电网的研究。虽然目前中国尚未明确提出微电网概念,但微电网的特点适应中国电力发展的需求与方向,在中国有着广阔的发展前景。

### 3 结束语

风电场装设无功补偿装置和采用储能技术,以及风电场和其他分布式电源组成微电网,可有效平稳风电场的出力,改善风电出力波动对接入电网的影响。许多学者在并网风电场的出力平稳控制方面做了大量的研究工作,但以下几个问题还有待进一步研究:①无功补偿装置和微电网中都引入很多先进的电力电子设备,它们大都是灵活可控的,如何实现对这些设备的智能控制和最优控制是一个很重要的问题;②进一步提高储能装置的能量转化效率,降低能量损失。

随着全球气候持续变暖和能源短缺,无论是发展中国家还是发达国家都开始大力发展风电。我国也积极制定了风电发展计划,按照国家发展规划中提出的目标,到2020年全国风电总装机容量将达到30GW,占届时发电装机容量的10%,2040年或2050年实现50GW乃至100GW,在届时的发电装机和发电量中占20%以上<sup>[38]</sup>。平稳控制并网风电场的出力,改善风电出力的随机性和波动性对接入电网的影响,将极大地提高风能的利用率,对于促进风电的大力发展具有积极的意义。

#### 参考文献 (References):

[1] 雷亚洲. 与风电并网相关的课题研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8):84-89.  
 [2] 施鹏飞. 2007年国内外风电发展情况[J]. 可再生能源, 2008, 26(3):7-12.  
 [3] 赵群,王永泉,李辉. 世界风力发电现状与发展趋势

[J]. 机电工程, 2006,23(12):16-18.  
 [4] 迟方德,王锡凡,王秀丽. 风电经变频输电装置接入系统研究[J]. 电力系统自动化, 2008,32(4):59-63.  
 [5] 计 崔. 大型风力发电场并网接入运行问题综述[J]. 上海电力, 2008(1):59-63.  
 [6] 黄守道,孙延昭,黄科元. 风电机组并网问题研究[J]. 电力科学与技术学报,2008,23(2):13-18.  
 [7] 戴慧珠,王伟胜,迟永宁. 风电场接入电力系统研究的新进展[J]. 电网技术,2007,31(20):16-23.  
 [8] 林 莉,陈亚宁,周 溶,等. 并网型风电场电压稳定研究[J]. 华东电力,2008,36(3):58-61.  
 [9] TAMURA J, YAMAZAKI T, UENO M, et al. Transient Stability Simulation of Power System Including Wind Generator by PSCAD/EMTDC [C]//Proceedings of IEEE Porto Power Tech Conference. Porto (Portugal):[s. n.], 2001: 538-542.  
 [10] CURTICE H. An assessment of load frequency control Impacts caused by small wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(1): 162-170.  
 [11] LARSSON A. Flicker emission of wind turbines during continuous operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 114-118.  
 [12] 任普春,石文辉,许晓艳,等. 应用 SVC 提高风电场接入电网的电压稳定性[J]. 中国电力, 2007, 40(11): 97-101.  
 [13] 杨培宏,刘文颖. 新型无功补偿装置稳定风力发电系统电压的研究初探[J]. 电气应用,2008, 27(5): 10-13.  
 [14] 范高锋,王纯琦,乔 元,等. SVC 补偿型定速风电机组模型及其特性分析[J]. 电网技术,2007,31(22): 64-68.  
 [15] 项 真,解 大,龚锦霞,等. 用于风电场无功补偿的 STATCOM 动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9):92-95.  
 [16] 范高锋,迟永宁,赵海翔,等. 用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报,2007,22(11): 158-162.  
 [17] 邹 超,王 奔,鲍 鹏. STATCOM 在风力发电场中的应用[J]. 电气传动, 2008,38(12):46-49.  
 [18] 张文亮,邱 明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.  
 [19] 阮军鹏,张建成,汪娟华. 飞轮储能系统改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电力科学与工程,2008, 24(3):5-8.  
 [20] 陈习坤,汤双清. 新型飞轮储能电池在独立运行式风力发电系统中的应用研究[J]. 节能,2005(1): 22-25.  
 [21] 王 健,王 昆,陈全世. 风力发电和飞轮储能联合系统的模糊神经网络控制策略[J]. 系统仿真学报,2007, 19(17):4017-4020.  
 [22] SPAHIC E, BALZER G, HELLMICH B, et al. Wind Energy Storages-Possibilities [C]//Power Tech., 2007 IEEE Lausanne, 2007:615-620.  
 [23] LERCH E. Storage of fluctuating wind energy [C]. Power

- Electronics and Applications, 2007 European Conference on, 2007:1-8.
- [24] 周友行,邓胜达. 基于压缩空气储能的小规模风力发电新技术[J]. 装备制造技术, 2008(1):103-104.
- [25] 邓隐北. 风力发电中的储能与超级电容器[J]. 上海电力, 2007,20(6):609-612.
- [26] 崔林,文劲宇,程世杰. 超导储能系统抑制风力发电功率波动的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(1):24-30.
- [27] 吴俊玲,吴畏,周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电工电能新技术, 2004,23(3):59-63.
- [28] 陈星莺,单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(12):63-66.
- [29] 张步涵,曾杰,毛承雄. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15):54-58.
- [30] 崔艳华,孟凡明. 钒电池储能系统的发展现状及其应用前景[J]. 电源技术, 2005, 29(11):776-780.
- [31] 桂长清. 风能和太阳能发电系统中的储能电池[J]. 电池工业, 2008,13(1):50-54.
- [32] LOGENTHIRAN T, SRINIVASAN D, WONG D. Multi-agent Coordination for DER in Microgrid [C]//IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008. Singapore: [s. n.], 2008: 77-82.
- [33] LAAKSONEN H, KAUHANIEMI K. Voltage and Current THD in Microgrid with Different DG Unit and Load Configurations [C]//IET-CIRED Seminar on Smart Grids for Distribution New York: [s. n.], 2008:1-4.
- [34] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007,31(19):100-107.
- [35] 杨艳天,张有兵,翁国庆. 微网并网控制策略的研究[J]. 机电工程, 2010,27(2):14-16.
- [36] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008,32(7):98-103.
- [37] 郑漳华,艾芊. 微电网研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008,32(16):27-31.
- [38] 张明锋,邓凯,陈波,等. 中国风电产业现状与发展[J]. 机电工程, 2010,27(1):1-3.

[编辑:罗向阳]

(上接第 3 页)

由图 7 可以看出,储液槽沿轴向方向受力基本没有变化;而沿着槽壁方向,力的大小呈梯度变化。

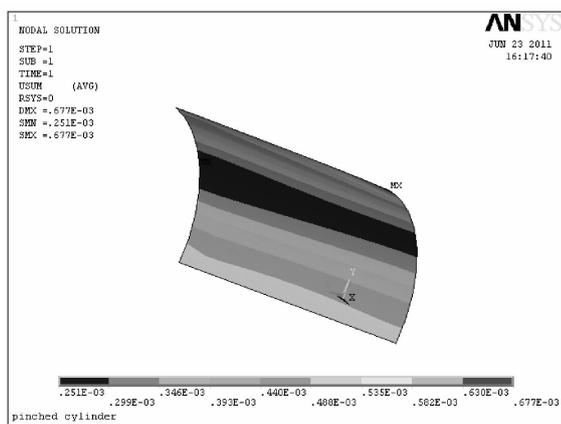


图 7 合位移等值线图

## 4 结束语

本研究讨论了循环式多级超声波反应釜储液槽的结构,并从理论上分别对储液槽内温度场的分布以及储液槽壁应力分布进行了详细的分析,利用有限元分析软件对温度场和应力作了分析,结果都符合设计要求。

通过软件分析,可以清楚地知道储液槽温度最高点和受力最大处,这些地方相对于其他部位容易损坏一些,但本研究中的理论压强较小,故设计的储液槽具

有较高安全性。

## 参考文献 (References):

- [1] 周晓燕. 反应釜智能控制器研究与开发[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院, 2005.
- [2] 张涛,常琳,吴霄,等. 超声化学的发展与应用[J]. 技术与创新管理, 2008,29(5):523-525.
- [3] 王爱玲,祝锡晶,吴秀玲. 功率超声振动加工技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
- [4] 周昌玉,贺小华. 有限元分析的基本方法及工程应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [5] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 3版. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [6] 张洪信,赵清海. ANSYS 有限元分析完全自学手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [7] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [8] 李瑞. 基于 ANSYS 的金刚石合成腔内的温度场分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008,38(3):535-538.
- [9] 陈碧莹,肖曙江. 木工机械用高速电主轴散热结构与温度场分析[J]. 机电工程技术, 2010,39(5):28-30, 99.
- [10] 王伟,刘启跃,王文健. 基于 ANSYS 的轻轨摩擦热效应分析[J]. 机械, 2010,37(1):12-14.
- [11] 王奇芳. 小型超声乳化器研制[D]. 杭州:杭州电子科技大学机电工程学院, 2007.

[编辑:罗向阳]