

微电网储能技术研究综述

周林, 黄勇, 郭珂, 冯玉

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆400030)

摘要: 对储能技术在微电网中的应用研究进行了综述。简要回顾了储能技术的发展历程, 阐述了微电网中储能技术研究的意义和价值。分析了储能技术在微电网中的作用, 比较全面地介绍了蓄电池储能、飞轮储能、超导储能、超级电容器储能、混合储能和其他储能在微电网中的应用研究现状, 分别说明了各种储能方式的优点和不足之处, 并对各种储能方式的性能指标进行了比较。根据微电网的特点和要求, 指出了微电网储能技术研究目前存在的问题和未来发展趋势。

引言

在过去的几十年里, 电力系统已发展成为集中发电、远距离输电的大型互联网络系统。但是近年来随着用电负荷的不断增加, 而电网建设却没有同步发展, 使得远距离输电线路的输送容量不断增大, 电网运行的稳定性和安全性下降。并且现阶段用户对电能质量和电力品质的要求越来越高, 以及环境和政策因素使这种传统的大电网已经不能很好地满足各种负荷的要求。鉴于上述问题, 经过不断的发展, 逐步形成了一种特殊电网形式: 微电网。而储能系统作为微电网中必不可少的部分, 发挥了至关重要的作用^[1-2]。

微电网可被看作电网中的一个可控单元, 它可以在数秒钟内反应来满足外部输配电网络的需求, 增加本地可靠性, 降低馈线损耗, 保持本地电压, 保证电压降的修正或者提供不间断电源。微电网可以满足一片电力负荷聚集区的能量需要, 这种聚集区可以是重要的办公区和厂区, 或者传统电力系统的供电成本太高的远郊居民区等。由于我国大部分地区是农村地区, 供电可靠性不高, 断电事故时有发生, 然而提高可靠性的成本又相当昂贵。如果在负荷集中的地方建立微电网, 并利用储能系统储存电能, 当出现短时停电事故时, 储能系统就能为负荷平稳地供电。

因此, 储能系统在微电网中有非常大的市场前景, 对电网的电能质量、电网稳定性以及供电可靠性都有很大的提升。太阳能、风能等无污染可再生能源储存在储能系统中, 适时提供电能, 不需要投资大的发电站, 也不需要复杂的输送电网, 是一种投资少、又能有效应用可再生能源的节能措施。

1 储能技术在微电网中的作用

1.1 提供短时供电

微电网存在两种典型的运行模式: 并网运行模式和孤岛运行模式。在正常情况下, 微电网与常规配电网并网运行; 当检测到电网故障或发生电能质量事件时, 微电网将及时与电网断开独立运行。微电网在这两种模式的转换中, 往往会有功率缺额, 在系统中安装一定的储能装置储存能量, 就能保证在这两种模式转换下的平稳过渡, 保证系统的稳定。在新能源发电中, 由于外界条件的变化, 会导致经常没有电能输出(光伏发电的夜间、风力发电无风等), 这时就需要储能系统向系统中的用户持续供电。

1.2 电力调峰

由于微电网中的微源主要由分布式电源组成, 其负荷量不可能始终保持不变, 并随着天气的变化等情况发生波动。另外一般微电网的规模较小, 系统的自我调节能力较差, 电网及负荷的波动就会对微电网的稳定运行造成十分严重的影响。为了调节系统中的峰值负荷, 就必须使用调峰电厂来解决, 但是现阶段主要运行的调峰电厂, 运行昂贵, 实现困难。

储能系统可以有效地解决这个问题, 它可以在负荷低落时储存电源的多余电能, 而在负荷高峰时回馈给微电网以调节功率需求。储能系统作为微电网必要的能量缓冲环节, 其作用越来越重要。它不仅避免了为满足峰值负荷而安装的发电机组, 同时充分利用了负荷低谷时机组的发电, 避免浪费。

1.3 改善微电网电能质量

近年来人们对电能质量问题日益关注, 国内外都做了大量的研究[3-4]。微电网要作为一个微源与大电网并网运行

，必须达到电网对功率因数、电流谐波畸变率、电压闪变以及电压不对称的要求。此外，微电网必须满足自身负荷对电能质量的要求，保证供电电压、频率、停电次数都在一个很小的范围内。储能系统对于微电网电能质量的提高起着十分重要的作用，通过对微电网并网逆变器的控制，就可以调节储能系统向电网和负荷提供有功和无功，达到提高电能质量的目的。

对于微电网中的光伏或者风电等微电源，外在条件的变化会导致输出功率的变化从而引起电能质量的下降。如果将这类微电源与储能装置结合，就可以很好地解决电压骤降、电压跌落等电能质量问题。在微电网的电能质量调节装置，针对系统故障引发的瞬时停电、电压骤升、电压骤降等问题，此时利用储能装置提供快速功率缓冲，吸收或补充电能，提供有功功率支撑，进行有功或无功补偿，以稳定、平滑电网电压的波动。文献[3]利用储能系统来解决诸如电压骤降等电能质量问题。当微电网与大电网并联运行时，微电网相当于一个有源电力滤波器，能够补偿谐波电流和负载尖峰；当微电网与大电网断开孤岛运行时，储能系统能够很好地保持电压稳定。

1.4提升微电源性能

多数可再生能源诸如太阳能、风能、潮汐能等，由于其能量本身具有不均匀性和不可控性，输出的电能可能随时发生变化。当外界的光照、温度、风力等发生变化时，微源相应的输出能量就会发生变化，这就决定了系统需要一定的中间装置来储存能量[5]。如太阳能发电的夜间，风力发电在无风的情况下，或者其他类型的微电源正处于维修期间，这时系统中的储能就能起过渡作用，其储能的多少主要取决于负荷需求。

2微电网中各种储能方式比较

鉴于微电网系统的特点和储能的作用，对储能装置的性能特点具有较为独特的要求。概括起来包括：能量密度大，能够以较小的体积重量提供较大的能量；功率密度大，能够提供系统功率突变时所需的补偿功率，具有较快的响应速度；储能效率高；高低温性能好，能够适应一些特殊环境；以及环境友好等。现阶段微电网中可利用的储能装置很多，主要包括蓄电池储能、超导储能、飞轮储能、超级电容器储能^[6]等。

2.1蓄电池储能

蓄电池储能是目前微电网中应用最广泛、最有前途的储能方式之一。蓄电池储能可以解决系统高峰负荷时的电能需求，也可用蓄电池储能来协助无功补偿装置，有利于抑制电压波动和闪变。然而蓄电池的充电电压不能太高，要求充电器具有稳压和限压功能。蓄电池的充电电流不能过大，要求充电器具有稳流和限流功能，所以它的充电回路也比较复杂。另外充电时间长，充放电次数仅数百次，因此限制了使用寿命，维修费用高。如果过度充电或短路容易爆炸，不如其他储能方式安全。由于在蓄电池中使用了铅等有害金属，所以其还会造成环境污染。蓄电池的效率一般在60%~80%^[7]之间，取决于使用的周期和电学性质。

目前，按照其使用不同的化学物质，可以将蓄电池储能分为以下几种方式：

1) 铅酸蓄电池

尽管铅酸蓄电池还有不少缺点，但是目前能够商业化运用的主要还是铅酸蓄电池，它具有几个比较显著的优点：成本低廉，原材料丰富，制造技术成熟，能够实现大规模生产。但是铅酸蓄电池体积较大，特性受环境温度影响比较明显。

2) 锂离子电池

锂离子电池是近年来兴起的新型高能量二次电池，由日本的索尼公司在1992年率先推出。其工作电压高、体积小、储能密度高（300~400kWh/m³）、无污染、循环寿命长。但是锂离子电池要想大规模生产还有一定难度，因为它特殊的包装和内部的过充电保护电路造成了锂离子电池的高成本。

3) 其他电池

随着技术的不断发展，近年来钠硫电池和液流钒电池的研究取得突破性进展。这两种电池具有高能量效率、无放电现象、使用寿命长等优良特性^[8]，在国外一些微电网研究系统中得到运用^[9]。但是，由于价格原因，在微电网中的大规模运用还有待时日。

2.2 超导储能

超导储能系统 (SMES) 利用由超导体制成的线圈, 将电网供电励磁产生的磁场能量储存起来, 在需要时再将储存的能量送回电网或直接给负荷供电。

SMES与其他储能技术相比, 由于可以长期无损耗储存能量, 能量返回效率很高; 并且能量的释放速度快, 通常只需几秒钟, 因此采用SMES可使电网电压、频率、有功和无功功率容易调节^[10]

。但是, 超导体由于价格太高, 造成了一次性投资太大。随着高温超导和电力电子技术的发展促进了超导储能装置在电力系统中的应用, 在20世纪90年代已被应用于风力发电系统和光伏发电系统。SMES快速的功率吞吐能力和较为灵活的四象限调节能力, 使得它可以有效地跟踪电气量的波动, 提高系统的阻尼。文献[11]提出使用超导储能单元使风力发电机组输出的电压和频率稳定, SMES单元接于异步发电机的母线上, SMES的有功控制器采用异步发电机的转速偏差量作为控制信号。文献[12]利用超导储能系统使光伏系统运行稳定性增加, 并能提高吸收和释放有功、无功的速率。

2.3 飞轮储能

飞轮储能技术是一种机械储能方式。早在20世纪50年代就有人提出利用高速旋转的飞轮来储存能量, 并应用于电动汽车的构想。但是直

到80年代, 随着磁悬浮技术、高强度碳素纤维和现代电力电子技术的新进展^[13-14], 使得飞轮储能才真正得到应用。

飞轮储能的原理如图1所示。当飞轮存储能量时, 电动机带动飞轮旋转加速, 飞轮将电能储存为机械能; 当外部负载需要能量时, 飞轮带动发电机旋转, 将动能变换为电能, 并通过电力电子装置对输出电能进行频率、电压的变换, 满足负载的需求。

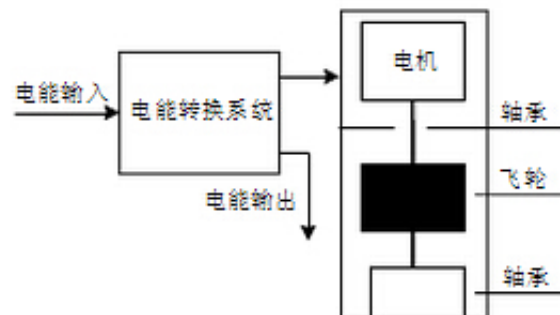


图1 飞轮储能原理图

Fig.1 Schematic of flywheel energy storage

飞轮储能具有效率高^[15-16]

、建设周期短、寿命长、高储能量等优点, 并且充电快捷, 充放电次数无限, 对环境无污染。但是, 飞轮储能的维护费用相对其他储能方式要昂贵得多。国内外对其在微电网中的运用做了不少研究。文献[17]提到利用飞轮储能解决微电网稳定性的问题, 建立了微网中的飞轮储能模型, 并利用PQ控制实现了系统的稳定性。文献[18]采用静止无功补偿器与飞轮储能系统相结合, 以减小风电引起的电能质量问题, 文中建立了系统的模型, 并取得了很好的效果。

2.4 超级电容器储能

超级电容器是由特殊材料制作的多孔介质, 与普通电容器相比, 它具有更高的介电常数, 更大的耐压能力和更大的存储容量, 又保持了传统电容器释放能量快的特点, 逐渐在储能领域中被接受。根据储能原理的不同, 可以把超级电容器分为双电层电容器和电化学电容器。

超级电容器作为一种新兴的储能元件, 它与其他储能方式比较起来有很多的优势。超级电容器与蓄电池比较具有功率密度大、充放电循环寿命长、充放电效率高^[19]、充放电速率快^[20-21]

、高低温性能好、能量储存寿命长^[22]

等特点。与飞轮储能和超导储能相比, 它在工作过程中没有运动部件, 维护工作极少, 相应的可靠性非常高。这样的特点使得它在应用于微电网中有一定优势。在边远的缺电地区, 太阳能和风能是最方便的能源, 作为这两种电能的储

能系统, 蓄电池有使用寿命短、有污染的弱点, 超导储能和飞轮储能成本太高, 超级电容器成为较为理想的储能装置。目前, 超级电容器已经不断应用于诸如高山气象台、边防哨所等的电源供应场合。

但是超级电容器也存在不少的缺点, 主要有能量密度低、端电压波动范围比较大^[23-24]、电容的串联均压问题^[25-26]。

2.5 超级电容器与蓄电池混合储能系统

从蓄电池和超级电容器的特点来看, 两者在技术性能上有很强的互补性。蓄电池的能量密度大, 但功率密度小, 充放电效率低, 循环寿命短, 对充放电过程敏感, 大功率充放电和频繁充放电的适应性不强。而超级电容器则相反, 其功率密度大, 充放电效率高, 循环寿命长, 非常适应于大功率充放电和循环充放电的场合, 但能量密度与蓄电池相比偏低, 还不适宜于大规模的电力储能。

如果将超级电容器与蓄电池混合使用, 使蓄电池能量密度大和超级电容器功率密度大、循环寿命长等特点相结合, 无疑会大大提高储能装置的性能。文献[27-31]研究发现, 超级电容器与蓄电池并联, 可以提高混合储能装置的功率输出能力、降低内部损耗、增加放电时间; 可以减少蓄电池的充放电循环次数, 延长使用寿命; 还可以缩小储能装置的体积、改善供电系统的可靠性和经济性。国外在这方面作了一些理论研究和模型测试, 文献[32-35]研究了混合储能系统在可再生能源的利用。

根据系统的实际情况和负载用电的要求, 蓄电池和超级电容器可以包括直接并联、同电感器并联和同功率变换器并联等^[36], 通过后一种方式可以利用功率变换器的变流作用, 获得最大的性能提高。

2.6 其他储能

在微电网系统中, 除了以上几种储能方式外, 还有可能用到抽水储能、压缩空气储能等。抽水储能在集中方式中用得较多, 并且主要是用来调峰。压缩空气储能是将空气压缩到高压容器中, 它是一种调峰用燃气轮机发电厂, 但是当负荷需要时消耗的燃气比常规燃气轮机消耗的要少40%。表1为各种储能方式性能比较。从表1可以看出, 现阶段由于技术和成本的原因, 铅酸蓄电池的优势还比较明显, 但是从长远考虑, 随着其他储能方式价格的下降、技术的成熟和环保要求的逐渐提高, 其他储能以及混合储能将会在微电网中得到更加广泛的运用。

表 1 各种储能方式性能比较

Tab.1 Performance comparison of various energy storage methods

储能方式	能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	功率密度/(W·kg ⁻¹)	使用寿命/y	效率/%	安全性	维护量	对环境的影响	年平均价格/(元·kWh ⁻¹)
超级电容器	2~57	000~18 000	30	95	高	小	无污染	750
超导储能	<1	000	30	90	低	大	无污染	1 800
铅酸蓄电池	30~200	100~700	8	92	高	较小	污染	120
飞轮储能	5~50	180~1	30	90	不高	较大	无污染	500

3 微电网储能研究发展趋势

通过以上分析可知, 各种储能方法都不能完全兼顾安全性、高比功率、高比能量、长使用寿命、技术成熟以及工作温度范围宽等多方面的要求。由于微电网储能技术发展还处于起步阶段, 各种储能技术发展还很成熟, 因此微电网中的储能技术还有很大的研究前景和发展空间。

1) 研发快速高效低成本的储能电池: 现阶段成本过高是储能技术大规模推广运用的最大瓶颈, 提高转换效率和降低成本是储能技术研发的一个重要方向。储能技术在提高微电网稳定性和电能质量的过程中, 电能的存储和释放速度是控制的关键。

2) 各种储能技术的有机结合: 由于各种微电网储能方法均存在着一定的缺点或者局限性, 并且由于本身的固有特性对其进行改进又要付出实现难易度以及成本上的代价, 因此对各种方法有机结合则可以扬长避短, 充分发挥各种方法的优点, 实现能量和功率等方面的多重要求, 并且可以显著延长储能元件的循环寿命, 这也成为储能研究的一个新热点。文献[37-38]提出在分布式发电中以燃料电池做主能量源, 蓄电池和超级电容器作辅助能源, 提高系统使用寿命。

3) 储能系统在微电网中应用的分析理论和方法: 在充分理解含储能装置的微电网的动态特性的基础上, 研究储能装置内部的复杂非线性电磁问题, 以及储能装置和系统中元件之间的相互作用。

4) 市场化条件下储能装置实现能量管理的理论和方法: 微电网中储能装置的拥有者必须得到实时的电网信息, 包括电价以及电网故障等, 才能使微电网储能装置的作用得到充分发挥。

4 结语

近年来, 由于大电网运行稳定性、安全性的下降, 电力系统集中式、超高压输电的弊端显现出来, 而微电网的出现很好地实现分散电力负荷的需求, 提高大电网的可靠性。储能技术作为微电网中十分重要的一个环节, 它起着提高微电网电能质量、增加系统稳定性、提高微电网经济效益、承担电力调峰等功能, 起着非常重要的作用。随着可再生能源的蓬勃发展, 微电网的不断建设, 储能技术的不断发展进步, 储能技术在微电网中将得到更加广泛的应用。

参考文献

- [1]郭力, 王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 82-86.
- [2]周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.
- [3]Carr J A, Balda J C, Mantooth H A. A survey of systems to integrate distributed energy resources and energy storage on the utility grid[C]. //IEEE Energy 2030 Conference. 2008: 1-7.
- [4]Chung Y H, Kim H J, Kim K S, et al. Power quality control center for the microgrid system[C]. //The 2nd IEEE Power and Energy Conference. 2008: 942-947.
- [5]鲁宗相, 王彩霞, 阎勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
- [6]程红丽, 王立, 刘建, 等. 电容储能的自动化终端备用开关电源设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 116-120.
- [7]Schainker R B. Executive overview-energy storage options for a sustainable energy future[C]. //IEEE PES General Meeting. 2004: 2309-2314.
- [8]王文亮, 葛宝明, 毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.
- [9]Kawakami N, Sumita J, Nishioka K, et al. Study of a control method of fuel cell inverters connected in parallel and verification test result of an isolated micro grid[C]. //Power Conversion Conference. 2007: 471-476.
- [10]林继如, 尹忠东, 颜全清. 基于超导储能的动态电压恢复器的研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 609-614.
- [11]陈星莺, 刘孟觉, 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): 64-66.
- [12]ZHANG Hui, WANG Xin, REN Jing, et al. Research on superconducting magnetic energy storage in the photovoltaic distributed generation[C]. //The 6th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009: 2198-2202.
- [13]Tao H, Kotsopoulos A, Duarte J L, et al. A soft-switched three-port bidirectional converter for fuel cell and super capacitor applications[C]. //IEEE 36th on Power Electronics Specialists Conference. 2005: 2487-2493. [14]Feng X, Liu J, Lee F C. Impedance specifications for stable DC distributed power systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(2): 157-162.
- [15]Zhang C, Tseng K J. A novel flywheel energy storage system with partially-self-bearing flywheel-rotor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 477-487.
- [16]Upadhyay P, Mohan N. Design and FE analysis of surface mounted permanent magnet motor/generator for high-speed modular flywheel energy storage systems[C]. //IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2009: 3630-3633.
- [17]Jayawarna N, Wut X, Zhangt Y, et al. Stability of a microgrid[C]. //The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. 2006: 316-320.

- [18]Suvire G O , Mercado P E. Dstatcom coupled with aflywheel energy storage system[C]. //Power Electronics Conference. 2009: 58-64.
- [19]唐西胜, 齐智平. 基于超级电容器储能的独立光伏系统[J]. 太阳能学报, 2006, 27 (11) : 1097-1101. TANG Xi-sheng , QI Zhi-ping. Study on a stand-alone PV system with ultracapacitor as energy storage device[J]. Acta Energiae Solaris Sinica , 2006 , 27 (11) : 1097-1101.
- [20]Spyker R L , Nelms R M. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems , 2000 , 36 (3) : 829-836.
- [21]Khan N , Mariun N , Zaki M , et al. Transient analysis of pulsed charging in supercapacitors[C]. //Proceedings of TENCON, 2000: 193-199.
- [22]Cegnar E J , Hess H L , Johnson B K. A purely ultracapacitor energy storage system hybrid electric vehicles utilizing a based DC-DC boost converter[C]. //19th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2004: 1160-1164.
- [23]Barrade P , Rufer A. Considerations on the energy efficiency of a supercapacitive tank[C]. //International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. 2002: 3-5.
- [24]Spyker R L , Nelms R M. Double layer capacitor/DC-DC converter system applied to constant power loads[C]. //Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 1996: 255-259.
- [25]Yao Y Y , Zhang D L , Xu D G. A study of supercapacitor parameters and characteristics[C]. //International Conference on Power System Technology. 2006: 1-4. [26]Rizoug N , Bartholomeus P , Vulturescu B , et al. Voltage sharing in supercapacitor modules : experimental study [C]. //35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2004: 690-696.
- [27]Thounthong P , Rael S. The benefits of hybridization[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine , 2009 , 3 (3) : 25-37.
- [28]Li Wei , Joos G , Belanger J. Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics , 2010 , 57 (4) : 1137-1145.
- [29]Allegre A L , Bouscayrol A , Trigui R. Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid Energy Storage Systems for traction applications[C]. //IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2009:213-220.
- [30]Zhang Yu , Jiang Zhenhua , Yu Xunwei. Small-signal modeling and analysis of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems[C]. //IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2009: 1-8.
- [31]Zhang Yu , Jiang Zhenhua. Dynamic power sharing strategy for active hybrid energy storage systems[C]. // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2009: 558-563.
- [32]Nozaki Y , Akiyama K , Kawaguchi H , et al. An improved method for controlling an EDLC-battery hybrid stand-alone photovoltaic power system[C]. //15th annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2000: 781-786.
- [33]Nozaki Y , Akiyama K , Kurokawa H K , et al. Evaluation of an EDLC-Battery hybrid stand-alone photovoltaic power system[C]. //The 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2000: 1634-1637.
- [34]Glavin M E , Chan P K W , Hurley W G. Optimization of autonomous hybrid energy storage system for photovoltaic applications[J]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition , 2009 , 1417-1424.
- [35]Bzura J J , Bin J. The renewable energy & storage (RES) project : summary of a panel session presentation[C]. //IEEE Power & Energy Society General Meeting. 2009: 1-4.
- [36]Palma L , Enjeti P , Howze J W. An approach to improve Battery run-time in mobile applications with supercapacitors[C]. //34th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference. 2003: 918-923. [37]Thounthong P , Sethakul P , Rael S , et al. Control of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid source for vehicle applications[C]. //IEEE International Conference on Industrial

Technology. 2009: 1-6.

[38]Thounthong P , Sethakul P , Rael S , et al. Performance evaluation of fuel cell/Battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications[C]. //IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2009: 1-8.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/89806.html>