

分布式储能设备参与电网调频的技术可行性研究

Technical feasibility study on distributed energy storage equipment participating in grid frequency modulation

孙大刚

Dagang Sun

国网冀北电力有限公司张家口供电公司宣化区供电中心 中国·河北 张家口 075100

State Grid Hebei North Power Company Limited Zhangjiakou Power Supply Company Xuanhua District Power Supply Center, Zhangjiakou, Hebei, 075100, China

摘要: 分布式储能设备在电力充裕时将交流电能转换为其它能量形式存储起来, 用电紧张或其它必要时将存储能量转换成交流电为负载提供电能, 本文通过分析基于脉冲宽度调制 (PWM) 技术双向换流器的基本原理, 讨论分布式储能设备参与电网一次调频的技术可行性, 并初步给出技术方案。

Abstract: EDS(Distribute Energy Storage)When power is abundant, the alternating current can be converted to other energy forms, and the stored energy is converted into alternating current to provide electric energy for the load by electric tension or other necessary.This article through the analysis the bidirectional converter that based on pulse width modulation (PWM) technology , to discuss the technical feasibility of DES participate PFR , and gives a Preliminary technical scheme of that.

关键词: 分布式储能; 电网一次调频; 技术可行性

Keyword: DES; PFR technical; feasibility

DOI: 10.36012/etr.v2i9.2667

0 引言

为了满足电力用户设备、发电厂发电设备和电力系统正常运行的需要, 必须根据各个电力系统的特点, 进行系统频率调节, 保证系统频率质量。近年发展起来的能量存储技术, 可以提供一种简单的解决电能供需不平衡问题的办法。分布式储能装置本身具备根据指令迅速完成电能存储或电能输出两种工作方式的切换。随着分布式储能装置在用户侧大量推广使用, 有必要研究其参与电网一次调频的技术可行性。

1 电力系统的频率特性

电力系统的频率特性如图 1 所示:

发电机组的功率—频率特性与负荷的功率—频率特性曲线的交点就是电力系统频率的稳定运行点。

a 点: (f_e , P_L), 系统初始的稳定运行点。

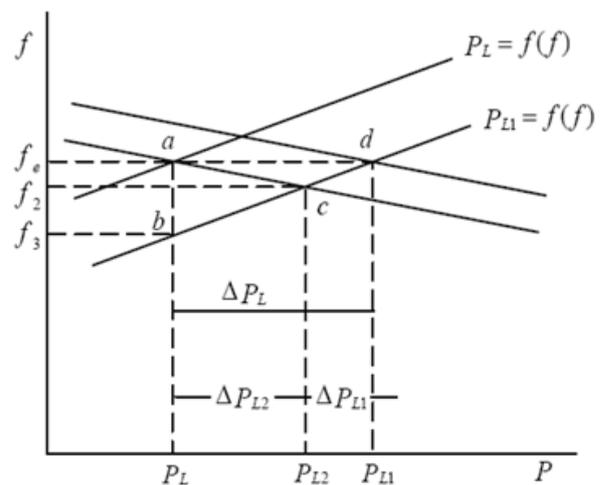


图 1 电力系统的频率特性

b 点: 负荷增加 ΔPL , 负荷静态频率特性变为 PL_1 , 当无调速器调频时, 频率稳定值下降到 f_3 , 取用功率仍然

【作者简介】 孙大刚 (1978~), 男, 河北宣化人, 助理工程师, 从事国网电力营销研究。

为原来的 PL 值。

c 点：调速器进行一次频率调节，增加机组的输入功率 PT。频率稳定在 f_2 。

d 点：调频器进行二次频率调节，移动发电机组频率特性曲线，增加机组的输入功率 PT，频率稳定在 f_c 。

根据电力系统的频率特性，作为电源的发电机组，在系统频率低于额定频率时，按照机组一次调频特性，向电网增加有功功率输出，系统频率高于额定频率时，减少有功功率输出，输出功率的变化幅度和变化速率，在保证机组安全稳定运行的前提下，满足电网对机组一次调频在转速不等率、

调频死区、调频负荷范围、调频响应滞后时间等方面的指标要求。

分布式储能系统 (Distribute Energy Storage ,EDS) 为上述问题提供了行之有效的解决方案。分布式储能是指在用电侧将电能转换成机械能、化学能等其他能量形式储存起来，在需要时再转换成电能释放出来。用电侧蓄电池储能装置是以蓄电池作为储能介质，让用户有选择地从电网获取电能。图 2 (a) 为分布式储能设备在电网频率低于额定频率时工作模式，图 2 (b) 为电网频率高于额定频率时工作模式。

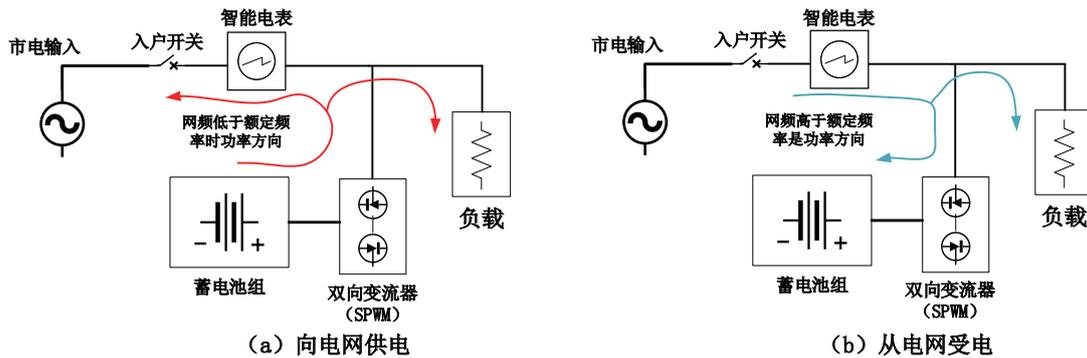


图 2 分布式储能系统的工作模式

以蓄电池作为储能介质的分布式储能设备主要元件包括：蓄电池、双向变流器、智能电表、控制器。蓄电池主要完成电能的存储和释放。双向变流器根据电网和用户的需求可以工作在整流状态，从电网吸收有功功率向蓄电池充电储能；也可以工作在逆变状态，将蓄电池直流电能逆变为交流，向电网和用户交流电能。智能电表除了实现电能的双向、分时计量功能外，还可以监测电网频率变化，作为分布式储能设备实现电网一次调频功能的频率实测值信号输入。

2 基于 PWM 技术双向变流器基本原理

脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 是对直流输入斩波脉冲的宽度进行调制的技术，通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要的波形 (含形状和幅值)。根据文献^[1]，PWM 控制技术在逆变电路中的应用最为广泛，对逆变电路的影响也最为深刻。在采样控制理论中有一个重要的结论：冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同，冲量即窄脉冲的面积。

如果把各输出波形用傅里叶变换分析，则其低频段非常接近，仅在高频段略有差异。典型的单相桥式 PWM 逆变电路如图 3 所示。通过控制 Q1、Q2、Q3、Q4 四个 IGBT 管的触发、关断脉冲，将蓄电池直流输入电压 U_d 斩波；在 RL 回路形成矩形交变脉冲 U_o 。信号波 U_r 为正弦波，跟踪市电输入电压波形，满足双向换流器与电网市电并网的电压幅值、相位和频率条件。载波 U_c 为三角波，通过控制三角波的幅值和频率，可以控制和调节双向换流器输出功率。双向换流器逆变波形调制原理见图 4。

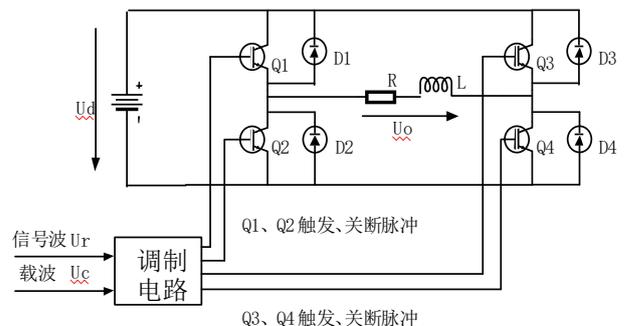


图 3 单相桥式 PWM 逆变电路

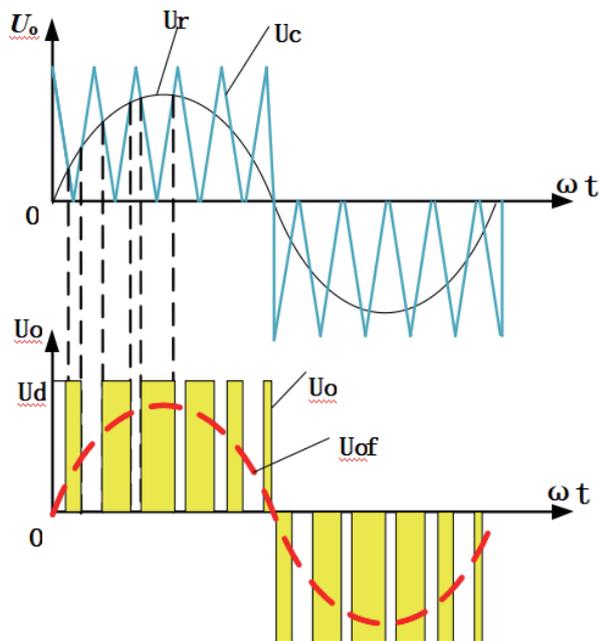


图 4 单极性 PWM 控制方波波形

图 4 中红色虚线电压 U_o 是双向换流器输出 U_o 中的基波分量。正弦波脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 波形由方波组成, 含有较多谐波成分, 需采用输出滤波器使输出波形正弦化。

根据文献^[2], 理想的交流—直流双向变流器应该具备下述性能:

- (1) 输出直流电压平稳且可以迅速地调节控制。
- (2) 输入的交流电源电流波形正弦化。

(3) 输入的交流电流的功率因数可控制为任意正或负值。

(4) 交流—直流之间的功率流向可以是双向可控的, 既可以实现整流, 也可以实现逆变。

下面以单相半桥型整流电路为例, 对双向变流器的整流、逆变、无功补偿和参与电网调频的工作原理进行说明 (假设变流器是无损耗的), 图 5 为双向变流器的接线原理图和等值电路图。

由 SPWM 逆变电路的工作原理可知, 按照正弦信号波和三角波相比较的方法对图 5 (a) 中的 T1、T2 进行 SPWM 控制, 就可以在桥的交流输入端 ao 产生一个 SPWM 波。当正弦信号波的频率和电源频率相同时, I_s 也为与电源 E_s 频率相同的正弦波, 在交流电源电压 E_s 一定的情况下, I_s 的幅值和相位仅由 U_{ao} 中基波分量 U_{aof} 的幅值及 U_{aof} 与 E_s 的相位差决定。改变 U_{aof} 的幅值和相位, 就可以使 I_s 和 E_s 同相位、反相位或使 I_s 和 E_s 的相位差为所需要的角度。因此, 双向变流器可以实现能量的正、反两个方向的流动, 既可以在整流状态, 从交流侧向直流侧输送电能; 也可以运行在逆变状态, 从直流侧向交流输送电能, 而且这两种方式都可以在单位功率因数下运行。所以, 只要控制变流器的正弦调制信号的幅值和相位, 就可以实现变流器的整流运行或逆变运行。图 6 为双向变流器运行时的相量图。

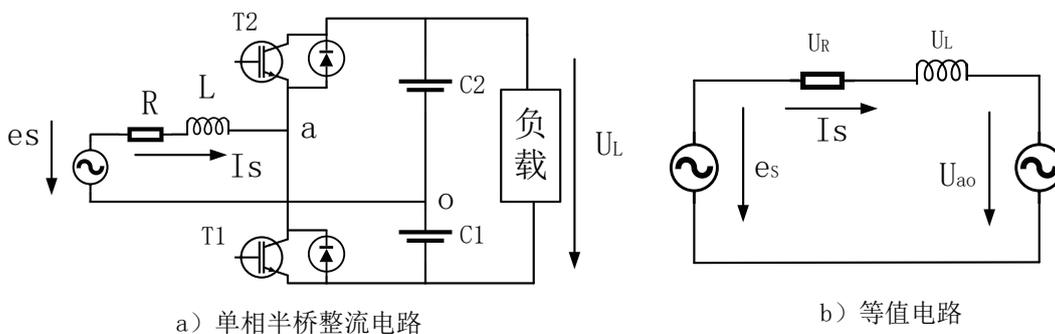
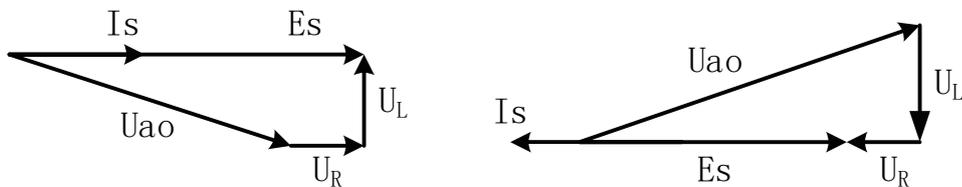


图 5 单相半桥型整流电路及等值电路



a) 双向变流器整流 (储能) 状态相量图

b) 双向变流器逆变 (供电) 状态相量图

图 6 双向变流器运行相量图

综上所述，由于双向变流器能够实现电能双向传输，分布式储能装置理论上具备参与电网调频的能力。

3 分布式储能装置实现电网一次调频控制流程

分布式储能装置参与电网一次调频，应考虑如下几个参数：

调频系数 k ：分布式储能装置调频功率 ΔP 与电网频率偏离额定频率 Δf 的关系曲线，即： $\Delta P = k \Delta f$ 。

调频死区 ε ：为了防止在电网频率小范围变化时，分布式储能装置频繁调节而设置的频差，当 $\Delta f < \varepsilon$ 时，装置不参与一次调频。

调频负荷范围：根据分布式储能装置设计参数，一次调频的调频功率受到装置本身设计额定输出功率的限制，调频负荷范围应小于分布式储能装置设计额定功率。

响应滞后时间 t ：电网频率变化后，分布式储能装置按照 $\Delta P = k \Delta f$ ，增加或减少有功输出，装置达到调频功率的延迟时间。

图 7 是由上述要素构成的分布式储能装置调频控制流程图。智能电表采集市电频率实时值 f ，与额定频率设定值 f_e （一般为 50Hz）比较，获得频率偏差 Δf ，根据设定的调频系数 k ，计算调频功率 ΔP ，控制器根据 ΔP 计算双向换流器控制器电流内环的电流给定值，实现一次调频功能。 U_d 为电池电压实测值， U_d 与电池储存电能成线性关系，控制器采集 U_d 实时值，用以限制调频功率 ΔP 不超出储能装置的设计额定功率。电压 U_o 为储能装置交流侧输出电压，控制器采集 U_{oa} 实时值，通过控制 U_{oa} 与 U_o 的相位差，实现向电网馈电或从电网用电。

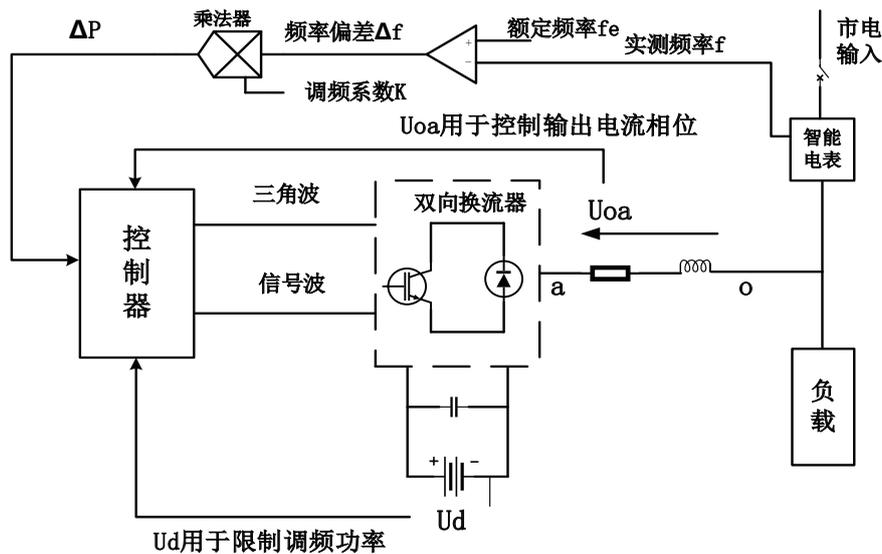


图 7 布式储能装置调频控制流程图

3 结论

综上所述，基于 SPWM 技术的分布式储能设备能够迅速的响应电网频率变化，通过切换储能和供电两种工作方式，参与电网的频率调节。

参考文献

- [1] 王兆安、黄俊. 电力电子技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2001：135.
- [2] 刘建戈，周建华. 用电侧蓄电池储能装置的研究 [J]. 《电气应用》，2008, 27 (13) : 65-68.