# 附录A

表**A1** 同步机惯性与虚拟惯性区别

**Tab.A1 Differences between synchronous inertia and virtual inertia**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 区别 | 同步机惯性 | 储能虚拟惯性 |
| 惯量连续性 | 固定且不可变更，与机组运行状态相关 | 连续且可设计 |
| 惯性响应延时 | 瞬时动作不存在延时 | 因测量环节与一阶惯性环节存在一定延时 |
| 惯性响应能量来源 | 同步发电机转子动能 | 储能装置中的电能 |
| 惯性与输出功率耦合 | 满足发电机最小发电功率 | 储能需预留一定的放电功率 |

表**A2** 同步机**PFR**与储能**PFR**区别

**Tab.A2 Differences between synchronous generator PFR and energy storage PFR**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 区别 | 同步机PFR | 储能PFR |
| 响应延时 | 不大于3s | 不大于0.5s |
| 完全响应时间 | 10~20s | 不大于2s |
| 与输出功率耦合 | 不得超过调速器相应限幅 | 理论上为全功率范围调节，但一般设有一定限幅 |

表**A3** 各类资源在频率响应过程中的作用阶段

**Tab.A3 The role of each type of resource in the frequency response process stages**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 资源类型 | 第1阶段 | 第2阶段 |
| 同步机惯性 | 扰动瞬间提供惯性支撑功率用于缓解初始RoCoF | 提供惯性支撑功率直至频率最低点时刻 |
| 储能虚拟惯性 | 受延时影响不起作用 | 延时之后提供惯性支撑功率直至频率最低点时刻 |
| 储能PFR | 受调频死区与动作延时影响不起作用 | 经过延时提供频率响应功率，直至频率稳定 |
| 同步机PFR | 受调频死区与动作延时影响不起作用 | 经过延时提供频率响应功率，直至频率稳定 |



图**A1** 同步机惯性“块状”特性

**Fig. A1 Synchronous inertia's "lumpy" characteristic**



图**A2** 动态频率响应过程中的响应时段划分

**Fig. A2 Response time division in the dynamic frequency response process**

# 附录B

下述介绍基于两阶段响应过程的频率最低点约束推导过程。假设储能虚拟惯性与同步机惯性等同，忽略延时，将式(7)等效写成：

 (B1)

其中虚拟惯量表示为：

 (B2)

式中，为储能虚拟惯性时间常数；为储能最大放电功率。

假设为频率最低点时刻，基于储能与同步机PFR爬坡模型，对式(B1)两边做积分，得到频率最低点表达式为：

 (B3)

 (B4)

 (B5)

 (B6)

式中，为频率最低点；为系统规定允许的最大频率偏差；、分别为储能与同步机PFR总容量。

由于储能PFR可以在百毫秒进行响应，频率将在同步机PFR启动之后到达最低点(同步发电机增发功率后才能够完全弥补功率缺额)，即频率最低点落在图1的中。因此，频率最低点时刻满足：

 (B7)

将式(B7)带入到式(B3)中，得到频率最低点表达式为：

 (B8)

将式(B8)带入到式(B4)中，并进行等效变换，得到频率最低点约束为：

 (B9)

因储能虚拟惯性存在延时，式(B9)是不考虑延时所得到的，即不符合式(6)与式(7)分段的要求。由于第1阶段仅由同步机惯性起频率支撑作用，可以将该阶段的频率跌落分量作为已知条件纳入到第2阶段频率响应过程中。第2阶段由同步机惯性和虚拟惯性共同作用，因频率最低点落在之后，在纳入频率跌落分量后，可以将频率最低点约束适当转化为符合式(B9)的形式，从而得到考虑储能虚拟惯性延时的频率最低点约束，其转化示意图如图B1所示。为进行等效转化，需对式(B9)中的、与进行修正，得到：

 (B10)

 (B11)

 (B12)

式中，为考虑虚拟惯性延时后，系统在第2阶段的等效最大频率偏差；、分别为考虑虚拟惯性延时后，储能与同步机PFR在第2阶段的等效延迟时间。

将式(B10)、(B11)与(B12)替换原式(B9)中的、与，得到考虑延时的频率最低点约束为：

 (B13)

将式(B13)化简得到频率最低点约束式(11)：

 (11)



图**B1** 第**2**阶段频率动态响应等效转化示意图

**Fig. B1 Equivalent transformation diagram of the frequency dynamic response of the second stage**



图**B2** 计及惯性与**PFR**的联合市场出清过程

**Fig. B2 The combined market clearing process of considering inertia and PFR**



图**B3** 考虑同步机惯性“块状”特性的出清模型

**Fig. B3 Clearing model of considering synchronous inertia's "lumpy" characteristic**

# 附录C

下述介绍式(11)转化为式(C10)的最低点二阶锥约束推导过程。将所推导的最低点约束原式(11)写为时段约束：

 (C1)

将式(C1)进行适当转化为式(C2)：

 (C2)

将式(C2)中的元素用、、替代，得到：

 (C3)

 (C4)

 (C5)

因此，式(C2)可以转化为：

 (C6)

将式(C6)转化为二范数的形式：

 (C7)

 (C8)

 (C9)

最后将、、的原式带入式(C9)，并提取出、、以及，可以得到式(C10)：



(C10)

对于式(C10)，定义左侧第一行与第二行对偶变量为、，右侧对偶变量为，其满足：

 (C11)

基于式(C10)与式(C11)可以得到拉格朗日函数为：

 (C12)

式中，、、分别为时段负荷功率平衡、RoCoF与准稳态约束的拉格朗日乘子；、与为时段频率最低点约束的拉格朗日乘子。

机组与储能日前市场收益为：

 (C13)

 (C14)

 (C15)

 (C16)

式中，、分别为时段机组与储能的单时段收益；、分别为机组与储能的全时段收益。

# 附录D

表**D1** 火电机组参数

**Tab.D1 Thermal unit parameters**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 最小出力/MW | 最大出力/MW | 惯性时间常数/s | 电能报价/($/MW⋅h) | PFR报价/($/MW⋅h) |
| 1 | 150 | 455 | 5 | 22.6 | 1 |
| 2 | 150 | 455 | 5 | 23.8 | 3.2 |
| 3 | 25 | 162 | 4 | 34.9 | 7.4 |
| 4 | 25 | 162 | 4 | 36.7 | 8.9 |
| 5 | 20 | 130 | 4 | 46.4 | 9.5 |
| 6 | 20 | 80 | 4 | 48.7 | 10.2 |
| 7 | 20 | 80 | 4 | 54.5 | 11.1 |
| 8 | 20 | 80 | 3 | 56.5 | 11.3 |
| 9 | 10 | 55 | 3 | 93.8 | 27.3 |
| 10 | 10 | 55 | 3 | 94.8 | 27.8 |

表**D2** 储能参数

**Tab.D2 Energy storage parameters**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 充放电最大功率/MW | 容量/(MW⋅h) | 虚拟惯性时间常数上限/s | | 充电报价/($/MW⋅h) | 放电报价/($/MW⋅h) | | 虚拟惯性报价/($/MWs⋅h) | PFR报价/($/MW⋅h) |
| 1 | 100 | 100 | 11 | 10 | | | 5 | 0.2 | 5 |
| 2 | 100 | 100 | 11 | 10 | | | 5 | 0.2 | 8 |
| 3 | 100 | 100 | 11 | 12 | | | 7 | 0.2 | 10 |
| 4 | 100 | 100 | 11 | 12 | | | 7 | 0.2 | 12 |



图**D1** 系统日负荷曲线与风电预测出力

**Fig. D1 Forecast output of system daily load curve and wind power**



图**D2** 算例**1**的机组状态

**Fig. D2 Unit state from example 1**



图**D3** 算例**3**的机组状态

**Fig. D3 Unit state from example 3**



图**D4** 算例**4**、**5**储能的虚拟惯性与PFR出清结果对比

**Fig. D4 The comparison of clearing results of example 4 and 5 in energy storage virtual inertia and PFR**