

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.01.017

# 柔性电负荷平衡装置对孤岛电网调频过程的影响研究

徐思佳

(中国电建集团江西省电力设计院有限公司,江西 南昌 330201)

**摘要:**孤岛电网是一种容量较小、频率和电压稳定度较差的特殊电网。文中针对此类电网运行情况,利用基于晶闸管的柔性电负荷平衡装置,建立一种考虑负荷端与发电机端协同出力的调频模型。采用 ETAP 仿真平台对苏拉威西某工业园电力系统使用不同调频模型的效果进行了仿真对比分析,结果表明:当系统突甩大负荷时,相对发电机单独调频模型,负荷端与发电机端协同出力的调频模型可使得系统频率波动更小,稳定频率更接近额定频率;当系统将接入大负荷时,提前投入电负荷平衡装置可以避免系统频率断崖式下跌,将频率下跌过程进行拆分,缓解系统内设备的压力。

**关键词:**孤岛电网;调频;柔性电负荷平衡装置;无差调节;突甩负荷;大负荷接入

**中图分类号:** TM743

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2022)01-0126-08

## 0 引言

电力系统在正常运行时,电网中的发电功率与用电功率相等,电网的频率保持稳定<sup>[1]</sup>。发电机具备一定的调节能力,当负荷功率发生变化时,发电机可以通过调速系统调整发电功率,维持功率平衡,保持频率稳定<sup>[2]</sup>。然而,处于孤岛运行的电网的发电机装机规模有限、旋转备用较小<sup>[3]</sup>,其调节能力有限<sup>[4]</sup>。孤岛运行作为一种特殊但又真实存在的电网运行方式,具有规模小、自平衡能力差的特点,任何负荷扰动都可能给孤岛电网频率带来较大的波动,甚至引发电网崩溃。因此维持频率稳定对保证孤岛电网长期稳定运行具有重大意义<sup>[5-6]</sup>。如何制定频率控制策略,避免电力系统运行情况因扰动迅速恶化成为研究的热点<sup>[7]</sup>。孤岛电网一般采用一次调频对系统频率进行调整,调差系数、调频死区和超速保护控制器(over speed protect controller, OPC)定值设置是影响一次系统调频能力的主要因素<sup>[8-10]</sup>。一次调频结合二次调频,可对电力系统频率进行无差调节<sup>[11]</sup>,通过超短期负荷预测对系统一、二、三次调节进行时序配置,可实现对孤岛频率的针对性控制<sup>[12-13]</sup>。

文献[8]分析了一次调频的工作原理,并针对调差系数、比例-积分-微分控制对系统频率变化的影响进行了讨论;文献[8-10, 14]未考虑系统内其他设备的调频能力,因此文献[15-16]提出利用系统内现有的储能设备和智能小区内的电动汽车充

电桩对电网功率进行平衡,达到调频的效果;文献[17]提出微型电网中负荷模型应考虑系统频率变化而非常规的恒定频率模型;文献[18]提出负荷频率因子和高抗补偿度也会对系统频率产生影响,建立了一种考虑负荷的系统调频模型;文献[19]以马达为例讨论了孤岛等阻抗与电网低压高频现象的联系,提出出现低频现象时应当针对负荷类型进行精确减载。鉴于上述方法无法实现系统频率的无差调节,文献[11]通过在换流器中引入频率偏差的积分控制,使换流器参与交流系统二次调频以实现系统频率的无差控制;文献[12]将超短期负荷预测引入孤岛调频模型,对调频设备出力进行时序上的调整,进一步提高系统调频效率。上述文献集中讨论了如何利用发电机或线路中已有储能设备进行调频,但这些调频策略在部分缺乏大型储能设备的孤岛系统中略显乏力。单纯依靠线路中的负载,无法避免大电网突甩大负荷时高频现象的发生。当存在大负荷并入系统或从电网断开时,系统可能会出现发电机调频乏力的情况,为避免发电机解列或者切除部分线路导致生产秩序混乱,须进一步分析对负荷端的调频能力。

文中提出在孤岛系统中负荷端并入具有稳定调频能力的柔性电负荷平衡装置(flexible electric load balancing device, FELBD)来平衡供需功率,建立负荷端调频模型实现极短时间频率的快速调节,并采用电力系统仿真平台进行仿真对比研究,实现突甩大负荷情况下系统频率的无差控制。

## 1 基于晶闸管的 FELBD

基于晶闸管的 FELBD 主要由晶闸管开关和镍

收稿日期:2021-08-13;修回日期:2021-10-21

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20171BAB2060-05)

铬合金的金属电阻器串联组成,由电阻器来消耗系统多余的有功功率。但是电阻受热后温度上升,电阻阻值会增大,在电压不变的情况下,电阻功率会下降。根据其镍铬含量的不同,电阻的温度系数不同,热态下的阻值是冷态阻值的1.05~1.6倍不等。采用晶闸管开关进行调节可以很好地解决阻值变化的问题。

在大功率电力电子产品中,应用最多、最成熟的电力电子器件是晶闸管和绝缘栅双极型晶体管,后者造价昂贵,控制复杂且故障率高,电子负荷采用晶闸管控制,在性能和工程应用上更具性价比<sup>[20]</sup>。晶闸管还具有调节平滑、响应速度快、调节次数不限等优点。晶闸管阀组的设计借鉴了静止无功补偿器中晶闸管及阻尼回路的设计<sup>[21-22]</sup>。

FELBD的等效单相电路模型见图1。该装置通过改变电力电子元件晶闸管在每个周期的导通角来改变功率元件上的电压和电流,进而改变整体的功率输出,如图2、图3所示。其中, $u_i$ 为晶闸管装置外部端电压; $i_a$ 为流过晶闸管装置的电流; $\theta$ 为装置导通角; $\alpha$ 为装置触发角; $u_{g1}$ , $u_{g2}$ 分别为VT<sub>1</sub>和VT<sub>2</sub>的触发脉冲;黑色阴影部分为到晶闸管导通时输出的有功/无功功率。电子负荷装置的主要控制手段是控制 $\alpha$ ,最终通过改变功率运行点实现冲击负荷补偿、频率振荡抑制等高级功能<sup>[23]</sup>。频率阻尼控制一般作为控制器的辅助功能,通过在主控制回路上叠加一个控制信号实现阻尼抑制<sup>[24]</sup>。

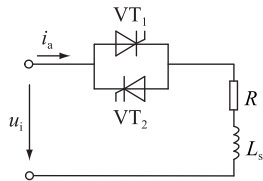


图1 FELBD 电路模型

Fig.1 FELBD electrical model

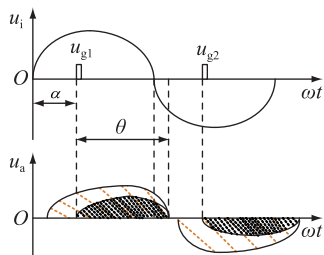


图2 FELBD 电压和电流

Fig.2 Voltage and current of FELBD

## 2 负荷调频模型

### 2.1 电力系统频率特性

现代社会生产中绝大多数设备都具备相应频

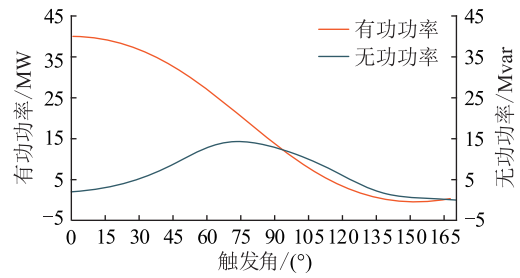


图3 FELBD 触发角和有功及无功功率曲线

Fig.3 Trigger angle and active power and reactive power curves of FELBD

率特性,系统频率的大幅度波动将影响电子设备工作,甚至损坏设备。系统频率偏差为:

$$\Delta f = f_N - f_0 = -\frac{\Delta P}{K_S} \quad (1)$$

式中: $f_N$ 为系统额定频率; $f_0$ 为系统实时频率; $K_S$ 为系统的单位调节功率; $\Delta P$ 为系统功率偏差。

系统功率偏差 $\Delta P$ 由发电机端总输出功率与负荷端总需求功率决定,因此有:

$$\Delta P = P_G - P_L = P_{LR} - P_L \quad (2)$$

式中: $P_G$ 为发电机端总输出功率; $P_{LR}$ 为负荷端实际总消耗功率; $P_L$ 为负荷端总需求功率。

发电机总输出功率与负载端总需求功率可由各电机输出功率与各负载需求功率求得:

$$P_L = \sum_{j=1}^J P_{Lj} \quad (3)$$

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_{Gi} \quad (4)$$

式中: $P_{Gi}$ 为第*i*台发电机的输出功率; $J$ 为系统中的负载数; $P_{Lj}$ 为第*j*个负载的需求功率。

### 2.2 负荷端调频模型

FELBD具有投切响应速度快、时序性好、高可靠、易控制的特点,通过添加FELBD可以对 $P_L$ 进行调整,从而消除系统功率偏差,进而解决发电机端调频能力受限的问题。而孤岛电网系统相对较小,因此改变负荷端需求功率成为可能,其主要依靠FELBD实现对电力系统中多余功率的吸收。

孤岛电网可能会出现以下2种典型工况。

(1) 突甩大负荷。孤岛电网运行状态下,突甩大负荷的具体情况如图4所示。

在50s之前,系统处于稳定状态,此时系统发电机端总输出功率,负荷端实际总消耗功率和负荷端总需求功率三者相等。在50s时,因为大容量负荷突然甩开造成负荷端总需求功率突降,此时 $P_{LR}$ 大于 $P_L$ ,导致电网频率上升。为防止冲击对发电机和生产设备造成巨大损耗加入FELBD,监视系统检测到负荷突降投入相应容量的FELBD维持 $P_{LR}$ 和

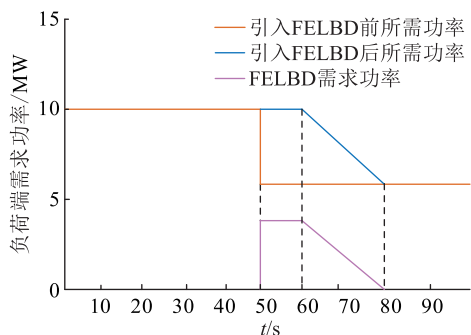


图4 突甩大负荷情况下负荷变化曲线

Fig.4 Load change curves during load fast cutting

$P_L$  的平衡,为发电机组进行调频争取时间,如 50~60 s 之间曲线所示。当被甩开负荷在短时间内不再需要启动时,孤岛电网将在 60~80 s 之间按时序依次切除 FELBD。

加入 FELBD 后,由于下游突甩负荷,可以认为投入 FELBD 需要在极短时间内完成,因此可以认为是瞬时性的,此时负载端总需求功率为:

$$P_{L2} = P_{L1} + k^* P_{LB} \quad (5)$$

$$k^* = \text{floor}\left(\frac{\Delta P}{P_{LB}}\right) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq k^* \leq K \quad (7)$$

$$0 \leq -K_s \Delta f_{\text{lim}} \leq \Delta P \quad (8)$$

式中:  $P_{L1}$  为引入 FELBD 前的负荷端总需求功率;  $P_{L2}$  为引入 FELBD 后的负荷端总需求功率;  $P_{LB}$  为负荷平衡系统中单个 FELBD 负荷(也称为 FELBD 的分辨率);  $k^*$  为电负荷平衡系统应投入设备个数;  $\text{floor}()$  为向下取整函数。当系统频率偏差高于系统允许频率正向波动上限  $\Delta f_{\text{lim}}$  时,系统将快速投入 FELBD 填补缺损负荷,维持系统平衡。假设系统中拥有  $K$  个 FELBD,每个设备的负荷为  $P_{LB}$ ,则柔性电负荷平衡系统最多可以填补  $K P_{LB}$  的负荷。

如系统短时间内无须重启负荷,可随时间逐渐切除 FELBD,假设在  $T_{EB}$  时刻系统已经开始切除负荷,则  $T$  时刻负荷端需求功率为:

$$P_L = P_{L2} + \left(k^* - \sum_{t=T_{EB}}^T k_E(t)\right) P_{LB} \quad (9)$$

$$\text{s.t. } 0 < \sum_{t=T_{EB}}^T k_E(t) \leq k^* \quad (10)$$

$$k_E(t) P_{LB} \leq (1 - \beta) \Delta P_{\text{lim}} \quad (11)$$

式中:  $k_E(t)$  为第  $t$  个单位时间内系统切除设备数;  $\Delta P_{\text{lim}}$  为发电机组单位时间增加最大出力;考虑要保留一定裕度,因此加入机组剩余出力裕度  $\beta$ 。

FELBD 最快切除时间为:

$$T_{E\text{min}} = \text{ceiling}\left(\frac{k^* P_{LB}}{\Delta P_{\text{lim}}}\right) \quad (12)$$

式中:  $\text{ceiling}()$  为向上取整函数。在最快切除情况下,不保留发电机组出力裕度或只保留极小裕度。

(2) 启动大负荷。孤岛电网运行状态下,启动大负荷的具体情况如图 5 所示。

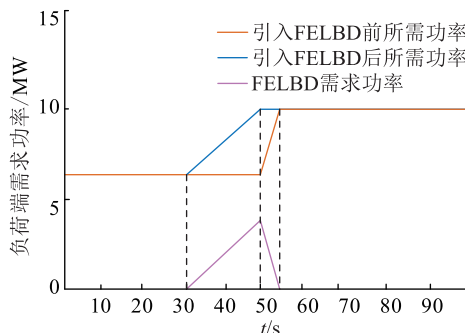


图5 启动大负荷情况下负荷变化曲线

Fig.5 Load change curves under heavy load input

在 50 s 时下游有大容量用电负荷准备启动,首先在 30 s 时逐步投入 FELBD,令  $P_L$  在 30~50 s 之间根据发电机组调频能力缓慢上升,促使发电机增加出力从而达到提前增大  $P_{LR}$  的目的,一旦监视系统检测到待接入线路负荷突升,马上切除相应容量的 FELBD 使  $P_{LR}$  和  $P_L$  保持动态平衡。期间设备切除情况如 50~55 s 之间 FELBD 需求功率曲线所示。

假设从  $T_{PB}$  时刻开始,功率平衡系统根据即将接入的大容量设备功率需求投入 FELBD,  $T$  时刻负荷端总需求功率应为:

$$P_{L2} = P_{L1} + \sum_{t=T_{PB}}^T k_p(t) P_{LB} \quad (13)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \sum_{t=T_{PB}}^T k_p(t) \leq K \quad (14)$$

$$k_p(t) P_{LB} \leq (1 - \beta) \Delta P_{\text{lim}} \quad (15)$$

式中:  $k_p(t)$  为第  $t$  个单位时间内电负荷平衡系统投入 FELBD 数。

系统如要接入大容量设备,应提前最小预留时间  $T_{P\text{min}}$  通知系统,保证 FELBD 投入工作顺利完成。最小预留时间可由式(16)求得。

$$T_{P\text{min}} = \text{ceiling}\left(\frac{P_{\text{EXP}}}{\Delta P_{\text{lim}}}\right) \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{EXP}}$  为计划启动设备增加的容量。在最小预留时间投入情况下,不保留发电机组出力裕度或只保留极小裕度。

系统在  $T_{PF}$  时刻完成 FELBD 投入工作,此时:

$$P_L = P_{L1} + P_{\text{EXP}} = P_{L1} + \sum_{t=T_{PB}}^{T_{PF}} k_p(t) P_{LB} \quad (17)$$

从  $T_{PF}$  开始启动大容量设备,系统需要根据系统增加负荷对 FELBD 进行切除,切除规则如下:



发电机转速、发电机端电压和系统频率均可以作为系统静态稳定器的输入,其中  $K_S$  为系统静态稳定器收益;  $A_1, A_2$  为频率滤波器时间常数;  $T_1, T_3$  为超前补偿时间常数;  $T_2, T_4$  为滞后补偿时间常数;  $T_5$  为冲洗时间常数;  $T_6$  为传感器时间常数;  $V_{SI}$  为稳定器装置输入的电压标么值;  $V_S$  为稳定器输出电压标么值;  $V_{SIMAX}, V_{SIMIN}$  分别为稳定器系统输出电压的最大和最小标么值。

系统静态稳定器的传递函数可根据图 9 求得:

$$K_S \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \frac{1}{1 + sT_6} \frac{sT_5}{1 + sT_5} \frac{1}{1 + A_1s + A_2s^2} V_{SI} V_S = \quad (23)$$

### 3 实例分析

文中采用印尼苏拉威西某工业园数据在 ETAP 平台上进行计算,该工业园位于苏拉威西岛上,负荷完全由岛上 150 MW 机组供电,属于典型的孤网运行。该电网 150 MW 机组经升压变与供电端 110 kV 母线相连接,通过双回联络线,由负荷端 110 kV 母线经降压变连接 0.485 kV 母线对 48 MW 负载进行供电。负荷包含电炉在内的多种时变非线性设备,电极动作、电炉放渣会导致系统出现大幅功率波动,塌料、电极烧断更会令部分负荷在一定时间内降低至零,对系统造成冲击。电炉设备的仿真等效模型如式 (24) 所示。

$$R(t) = CLe^{1/\{A+B[1-\cos(2\omega t+D+\theta)]\}} \quad (24)$$

式中:  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为系统频率,取 50 Hz;  $\theta$  为电流滞后电压相位角,功率因数  $\cos \theta = 0.92$ ;  $D$  为电弧热惯性影响因子;  $A = T_0/a$ ;  $B = (T_1 - T_0)/(2a)$ ;  $T_0$  为电弧最低温度,取 1 250 °C;  $T_1$  为电弧最高温度,取 1 500 °C;  $L$  为电弧弧长,取平均值 2 m。

为了避免系统频率出现长时间大幅度扰动,园区采取同时考虑负荷端与发电机端的频率控制模型。其中负荷端利用 6 回路共 60 MW 功率调节模块对系统频率进行快速调节,每回路包含 10 MW 功率部件, FELBD 采用分辨率为 0.1 MW 的基于晶闸管的柔性负荷平衡系统<sup>[18-19]</sup>; 机端采用汽轮机调速器、IEEE T3 励磁系统和 IEEE T1 电力系统静态稳定器对系统频率进行精准调节,其中汽轮机调速模型采用下垂控制方法,电力系统静态稳定器以电机角转速为输入,汽轮机调速器、励磁系统和电力系统静态稳定器参数如表 1—表 3 所示。

利用 ETAP 仿真平台针对突甩负荷和增加负荷 2 种工况进行仿真,图 10 为采用上述参数时突甩负

表 1 汽轮机调速器参数

Table 1 Turbine governor parameters

参数	数值	参数	数值
$K_D$	5	$T_{sr}/s$	0.1
$P_{max}/MW$	152.284	$T_c$	0.1
$P_{min}/MW$	0	$T_{ch}/s$	0.15
$F_{hp}$	0.7	$T_{th}/s$	5

表 2 励磁系统参数

Table 2 Excitation system parameters

参数	数值	参数	数值
$V_{Rmax}/p.u.$	17.5	$K_P/p.u.$	1
$V_{Rmin}/p.u.$	-15.5	$X_L/p.u.$	0.8
$V_{Bmax}/p.u.$	17.5	$T_A/s$	0.03
$K_A/p.u.$	250	$T_E/s$	1.25
$K_E/p.u.$	1	$T_F/s$	1
$K_F/p.u.$	0.06	$T_R/s$	0.005
$K_I/p.u.$	1		

表 3 电力系统稳定器参数

Table 3 System static stabilizer parameters

参数	数值	参数	数值
$K_S/p.u.$	3.15	$T_2/s$	0.1
$V_{SImax}/p.u.$	0.9	$T_3/s$	0.76
$V_{SImin}/p.u.$	-0.9	$T_4/s$	0.1
$A_1/p.u.$	0	$T_5/s$	1
$A_2/p.u.$	0	$T_6/s$	0.1
$T_1/s$	0.76		

荷系统频率变化情况。由图 10 可知,一回 48 MW 负荷线路在  $t = 1$  s 时突甩负荷,负荷端功率在短时间内大幅减少造成系统功率供需不平衡,机端发出功率大于负荷实际需求功率,导致系统频率快速上升,调速系统立即开始对系统进行一次调频。调速系统只能进行有差调节,因此系统频率最终稳定在 50.2 Hz 左右,在 0~5 s 期间,频率波动达到 0.2 Hz 以上。当 FELBD 投入工作后,系统频率得到明显改善。

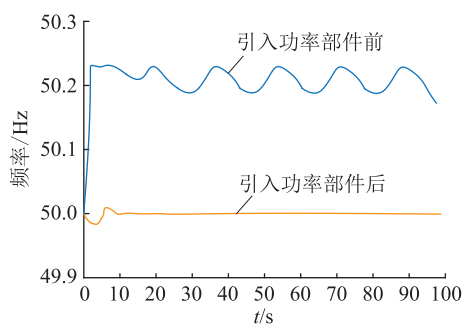


图 10 引入功率部件前后突甩负荷频率曲线

Fig.10 Frequency curve at fast load cutting with and without the introduction of power components

电网突甩负荷后,监视系统发现异常工况后即刻对系统功率平衡情况进行分析。经计算发现,单纯依靠机端调速系统无法快速将频率控制在允许范围内。根据监视系统得到的被甩负荷数值在  $t=1.2\text{ s}$  时刻投入 48 MW 的 FELBD。系统频率在短暂的振荡后迅速稳定在 49.983 Hz。由图 10 可知,在频率冲击发生后的最大频率波动只有 0.05 Hz,要远小于不投入 FELBD 时的波动。

通过自动控制系统对投入的 FELBD 进行调节,频率最终稳定位置也会发生变化,如图 11 所示。当投入 44 MW 时,在  $t=10\text{ s}$  时刻系统频率基本稳定在 50 Hz,说明加入 FELBD 可以在突甩负荷情况下实现对系统频率的无差调节。

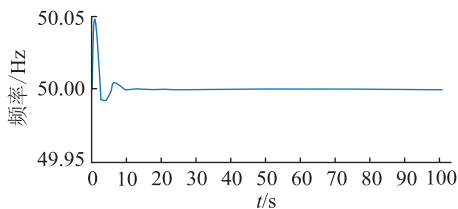


图 11 无差调节频率曲线

Fig.11 No-adjustment frequency curve

图 12 为采用上述参数时接入大负荷工况下频率变化情况。在  $t=51.1\text{ s}$  时刻系统有一回 48 MW 负荷线路接入系统,负荷端功率在短时间内大幅增加导致系统功率供需不平衡,系统频率在 5 s 时呈断崖式下跌,最终稳定在 49.8 Hz 左右。这样的频率波动会对系统内的设备造成损坏,给电机调频带来巨大压力。为了缓解电机调频压力,可提前投入 FELBD。

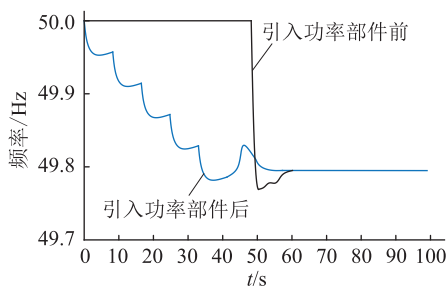


图 12 引入功率部件前后接入大负荷频率曲线

Fig.12 Frequency curve of heavy load input with and without the introduction of power components

监视系统得知 1 min 后有一回 48 MW 负荷线路需接入电网,系统判断此行为将对电网频率造成巨大冲击选择提前投入 FELBD,从  $t=1\text{ s}$  时刻开始,每 10 s 投入 10 MW 的 FELBD,至  $t=41\text{ s}$  时刻投入 4 MW 的 FELBD,在  $t=51\text{ s}$  时刻退出所有 FELBD 并在  $t=51.1\text{ s}$  时刻将负荷线路接入系统。由图 12 可

知,虽然系统频率最终依旧稳定在 49.8 Hz 左右,但是通过引入 FELBD 使得断崖式下跌区间被拆分成多个部分,引入大负荷线路对系统造成的冲击得到缓解。

## 4 结论

文中简要介绍了基于晶闸管的 FELBD 的基本原理。在传统发电端和负荷端的调频模型的基础上引入 FELBD 的调整函数,通过实际工程的仿真分析比较了 2 种情况下的频率响应曲线,得出以下结论:

(1) 在系统将接入大负荷前预先按梯次投入 FELBD 可以避免系统频率断崖式下跌的情况,减小频率波动对系统内设备造成的压力,大负荷接入系统前的提前调度对保持系统频率稳定至关重要。

(2) 在系统突甩大负荷的情况下投入 FELBD 可以使频率快速恢复稳定,大幅减小因系统功率供需不平衡导致的频率波动。

(3) 在突甩大负荷情况下,通过合理分配所投入的 FELBD,可以实现对系统频率的无差调节。

本文得到中国电建集团江西省电力设计院有限公司科技项目(JXEPDIKJ202001)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 陈雪梅,陆超,韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术,2020,39(1):1-9.  
CHEN Xuemei, LU Chao, HAN Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 1-9.
- [2] 王一振,马世英,王青,等. 电力系统孤网高频问题研究现状和发展趋势[J]. 电网技术,2012,36(12):165-169.  
WANG Yizhen, MA Shiyong, WANG Qing, et al. Present status and developing trend of research on over frequency in isolated power grid [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 165-169.
- [3] 兰秀蔚. 大型发电机检修中出现的问题分析及处理[J]. 江苏电机工程,2011,30(2):22-24,27.  
LAN Xiuwei. Research on issues occurred during maintenance period of large-scale power plants [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(2): 22-24, 27.
- [4] 鲁宗相,汤海雁,乔颖,等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力,2018,51(1):51-58.  
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review [J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.
- [5] 钟永洁,翟苏巍,孙永辉. 孤岛模式下互联电网的自适应同步频率控制[J]. 电力建设,2019,40(10):94-103.  
ZHONG Yongjie, ZHAI Suwei, SUN Yonghui. Adaptive synchro-

- nization frequency control for interconnected micro-grids in island mode [J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(10): 94-103.
- [6] PHULPIN Y. Communication-free inertia and frequency control for wind generators connected by an HVDC-link [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 1136-1137.
- [7] 张佳伟,唐胜利. 一次调频限幅对孤网高频的控制研究[J]. *计算机仿真*, 2014, 31(1): 136-140, 257.  
ZHANG Jiawei, TANG Shengli. Analytical study on primary frequency limiter in control of high frequency isolated network[J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(1): 136-140, 257.
- [8] 叶健忠,邹俊雄,龙霏,等. 地区电网火电机组孤网运行频率控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(7): 123-128.  
YE Jianzhong, ZOU Junxiong, LONG Fei, et al. Research on frequency control strategy for isolated grid operation of thermal power unit in regional power network[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(7): 123-128.
- [9] 李飞,肖仕武,王琮,等. 孤网发电机调速系统参数定量调整理论分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(21): 103-108.  
LI Fei, XIAO Shiwu, WANG Cong, et al. Analysis on quantitative parameter adjustment of speed governor in isolated power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(21): 103-108.
- [10] 王炜宇,李勇,曹一家,等. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统自适应下垂控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 142-149, 161.  
WANG Weiyu, LI Yong, CAO Yijia, et al. Adaptive droop control strategy participating in power grid frequency regulation for VSC-MTDC transmission system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 142-149, 161.
- [11] 陈继开,曾强,辛业春,等. 基于改进VSG的MMC-MTDC受端换流器二次调频控制策略[J]. *电网技术*, 2020, 44(4): 1428-1436.  
CHEN Jikai, ZENG Qiang, XIN Yechun, et al. Secondary frequency regulation control strategy of MMC-MTDC converter based on improved VSG [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(4): 1428-1436.
- [12] 李培强,丰云鹤,李欣然,等. 考虑超短期负荷预测的储能电池参与电网一次调频控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 87-93, 148.  
LI Peiqiang, FENG Yunhe, LI Xinran, et al. Control strategy for energy storage battery participating in primary frequency regulation of power grid considering ultra-short-term load forecasting [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 87-93, 148.
- [13] 刘林,许晓艳. 风电接入孤网后的频率控制策略[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(6): 49-53.  
LIU Lin, XU Xiaoyan. Study of frequency control strategy after integration of wind power into isolated network [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(6): 49-53.
- [14] 杨俊友,王海鑫,邢作霞,等. 孤岛模式下潮流能发电系统协调控制策略[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(14): 551-560.  
YANG Junyou, WANG Haixin, XING Zuoxia, et al. Coordination control strategy of tidal power generation in island grid [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(14): 551-560.
- [15] 邓霞,孙威,肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. *高电压技术*, 2018, 44(4): 1157-1165.  
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation [J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1157-1165.
- [16] LIU H, HU Z C, SONG Y H, et al. Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3480-3489.
- [17] 周博. 电力系统频率控制中的负荷建模与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
ZHOU Bo. Electric load modeling and application in power system frequency control [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [18] 吕思卓,郑超,彭利,等. 孤岛电网频率电压耦合机理及控制措施[J]. *中国电力*, 2018, 51(11): 53-60.  
LYU Sizhuo, ZHENG Chao, PENG Li, et al. Coupling mechanism and control measures of dynamic frequency and voltage in isolated power grid [J]. *Electric Power*, 2018, 51(11): 53-60.
- [19] 陆勇,张文朝,张祥成,等. 解列后孤岛电网电压失稳机理探讨[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(12): 81-86.  
LU Yong, ZHANG Wenchao, ZHANG Xiangcheng, et al. Study on mechanisms of voltage instability in islanding grid after fault disconnection [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(12): 81-86.
- [20] 曹一江,陈国成,李晓丹. 晶闸管三相调压器全程调压控制技术[J]. *大庆石油学院学报*, 2006, 30(2): 70-72, 149.  
CAO Yijiang, CHEN Guocheng, LI Xiaodan. Control technology of the thyristor three phase booster voltage adjusting [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2006, 30(2): 70-72, 149.
- [21] 童路,陈赤汉,谢门喜. 静止无功补偿器中的晶闸管阀组设计[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2011, 32(1): 33-37.  
TONG Lu, CHEN Chihan, XIE Menxi. Design of thyristor valves block in static var compensator [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2011, 32(1): 33-37.
- [22] 刘会金,彭疆南,陈孜孜,等. 电容器并补大功率晶闸管阀的研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2001, 13(1): 31-34.  
LIU Huijin, PENG Jiangnan, CHEN Zizi, et al. Study of high-power thyristor valve on capacitor shunt compensation [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2001, 13(1): 31-34.
- [23] 黄华,丁勇,常宝立,等. 基于高压调功器的冲击负荷平衡研究[J]. *江苏电机工程*, 2014, 33(4): 63-65.  
HUANG Hua, DING Yong, CHANG Baoli, et al. Research of impact load balancing based on high-voltage power regulator [J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2014, 33(4): 63-65.

- [24] 宋鹏程,甄宏宁,王震泉,等. UPFC 附加阻尼控制器设计研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):10-13,17.  
SONG Pengcheng, ZHEN Hongning, WANG Zhenquan, et al. Parameters tuning for UPFC auxiliary damping controller[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2015,34(6):10-13,17.
- [25] 吴熙,王亮,陈曦,等. UPFC 与 IPFC 提升系统输电能力比较研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(9):128-134.  
WU Xi, WANG Liang, CHEN Xi, et al. Comparative research on UPFC and IPFC enhancing transmission capability of a power system[J]. Power System Protection and Control,2020,48

(9):128-134.

作者简介:



徐思佳

徐思佳(1982),男,硕士,高级工程师,从事发电厂和电力系统的设计规划等相关工作(E-mail:13767037141@163.com)。

## The frequency modulation model considering the coordinated output of the load end and the generator end

XU Sijia

(Powerchina Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang 330201, China)

**Abstract:** Aiming at the special grid operation situation of the isolated power grid, the electric load balancing device is used to establish a frequency modulation model considering the coordinated output of the load side and the generator side. The ETAP simulation platform is used to simulate and analyze the power system of an industrial park in Sulawesi. It is found that when the system suddenly throws a large load, compared to the generator's independent frequency modulation model, the frequency modulation model of the load end and the generator end can make the system frequency fluctuation smaller and the stable frequency closer to the rated frequency. When the system is connected to a large load, putting in the electric load balancing device in advance can prevent the system frequency from falling off a cliff, and split the frequency falling process to relieve the pressure on the equipment in the system.

**Keywords:** isolated island power grid; frequency modulation; flexibility electric load balancing device; isochronous adjustment; load fast cutting; heavy load input

(编辑 钱悦)