

基于Z源电力弹簧和简化情感控制的 微电网电压和频率控制方法

龙 军, 郑宇琦, 卢 泉, 周子富

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要:为了减小可再生能源出力间歇性引起的电压和频率波动,提出了一种基于简化情感控制、使用Z源电力弹簧(ES)的微电网电压和频率稳定方法。针对ES逆变控制死区时间引起的输出波形畸变、谐波含量增加等问题,设计了一种带Z源网络的ES拓扑结构,利用Z源逆变器允许桥臂瞬时短路的特性,消除了驱动信号的死区时间,降低了ES输出电压的谐波含量;通过分析情感控制的自学习过程,对情感控制模型进行简化,去除了眶额皮质结构并隐藏了奖励信号,在保证良好控制效果的同时,减少了需整定的参数;设计了基于简化情感控制的ES控制器,简化情感控制器根据关键负载电压及系统频率偏差对ES的幅值及相位进行调节,实现了用1个ES同时进行电压和频率控制。系统仿真与实验结果表明,所提方法有较高的控制精度,设计的ES输出电压谐波含量较低,能有效稳定微电网的电压和频率波动。

关键词:微电网;电压控制;频率控制;电力弹簧;Z源网络;简化情感控制

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003019

0 引言

随着光伏、风电等可再生能源在微电网中的广泛应用,因电源间歇性、随机性出力导致的系统功率不平衡、电压和频率波动,已成为微电网中常见的电能质量问题^[1-2]。微电网联网运行时,其频率及电压由大电网支撑,而孤岛运行时,则主要采用电源代理控制^[3]、增设储能装置^[4]、无功补偿^[5]等方法稳定频率和电压。为了改善微电网的运行状态,一些文献提出在微电网中采用有功-频率(P/f)、无功-电压(Q/V)的控制方式对系统电压和频率进行调控。常规的 $P/f(Q/V)$ 控制方式以下垂控制为主^[6],下垂控制的优点是无需通信,通过模拟传统同步电机的下垂特性,实现系统的功率平衡。但下垂控制易使并联分布式电源产生环流,若环流较大,不仅增大逆变器的负担,还会额外消耗功率^[7]。孤岛运行时的微电网还可采用电压-频率(V/f)控制策略,电源根据频率及(或)电压的差值确定微电网中负荷功率的需求,进而调整输出功率,以保证频率和电压的稳定^[8]。采用 V/f 控制的微电网对储能装置的依赖较重,当功率缺额较大时,需要切除一些次要负荷,以保证主要负荷的供电^[9]。文献[10-11]提出基于成本、环境、稳定等因素的需求响应控制策略,采用直接控制负荷通断的方式,实现系统的功率平衡。

电力弹簧ES(Electric Spring)概念的提出为稳定电网运行提供了新思路。装设有ES的电网将负

载分为对电能质量等要求较高的关键负载以及对电能质量要求不高的非关键负载。ES与非关键负载串联,电源功率变化时,通过ES调节非关键负载的电压来改变其消耗的功率,从而实现源-荷功率平衡和稳定关键负荷的电压^[12]。由于常规ES采用的桥式逆变电路不允许上、下桥臂同时导通,其驱动信号必须留有死区时间,导致ES输出电压和电流畸变、谐波含量增加。文献[13]和[14]分别提出基于桥臂电流方向、电流矢量的死区时间补偿技术,降低了逆变器输出电压、电流的谐波含量;文献[15]提出一种带有Z源网络的逆变器拓扑结构,在传统逆变器的基础上整合了Boost功能,拓宽了逆变电压的输出范围;Z源逆变器允许逆变桥臂瞬时短路,消除了驱动信号的死区时间,使输出波形谐波含量大幅降低^[16]。

文献[17-18]分别提出基于比例积分(PI)控制、模糊控制等方法的ES稳压控制技术。文献[19]指出,使用ES调控电压时也能改善系统频率,但未提出具体的频率控制方法;文献[20]提出基于虚拟 dq 轴的ES控制策略,通过在 d 轴引入频率环、 q 轴引入电压环来调控频率和电压;文献[21]对系统电压和频率进行调控时,假设负载有功、无功功率的比例固定,而实际上,微电网负载是复杂的,且有可能是非线性负荷^[22]。ES大多采用常规PI控制,该方法易于实现,但不具有自学习能力,对控制精度有所影响。而情感控制器BELBIC(Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller)对于复杂对象有较好的优势^[23],既保留了传统PI结构,又具有良好的自适应能力和学习能力,但控制参数偏多,增加了整定难度。

本文设计了一种带Z源网络的ES拓扑结构,利

收稿日期:2019-06-11;修回日期:2020-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51567002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51567002)

用Z源网络允许桥臂瞬时短路的特性,消除死区时间,降低ES输出电压的谐波含量;并提出了基于简化情感控制的ES控制方法,利用简化情感控制的自学习功能,进行参数自动修正,提高ES的控制速度和精度,实现用1个ES同时进行稳压和稳频控制的功能。最后,通过仿真和实验,验证了所提设计方案的有效性。

1 带Z源网络的ES工作原理分析

1.1 ES的结构及工作原理

ES接入微电网的示意图见图1。图中, U_s 为电源电压; I_s 为馈线电流; U_{dc} 为ES的直流电源电压; $R_1 + j\omega L_1$ 为线路的阻抗; I_c 、 I_{nc} 分别为关键负载和非关键负载的电流; U_{ES} 为ES的端电压; U_c 、 U_{nc} 分别为关键负载 Z_c 和非关键负载 Z_{nc} 的端电压; $V_{T1} \sim V_{T4}$ 为桥臂功率管;K为ES旁路开关; L_f 、 C_f 分别为低通滤波器的电感和电容。

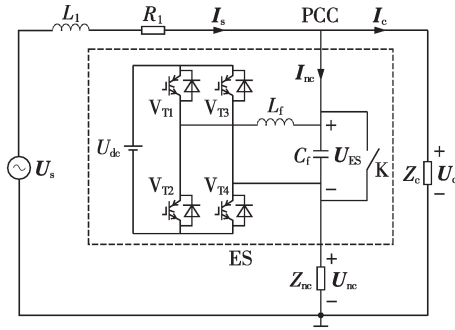


图1 ES接入电网拓扑

Fig.1 Topology of ES connected to grid

ES与 Z_{nc} 组成智能负载后与 Z_c 并联于公共耦合点(PCC)。控制系统产生脉宽调制(PWM)信号控制ES桥臂导通,调节 U_{ES} 实现电压和频率稳定的控制目标。非关键负载一般选取制热、制冷、照明等对电压要求宽泛的设备,关键负载则是对电能质量有严格要求的仪器设备。

ES可以定义为如附录中图A1所示的2种工作模式:感性模式(U_{ES} 超前 I_{nc} 90°)和容性模式(U_{ES} 滞后 I_{nc} 90°)。在运行过程中,ES的控制装置实时监测线路电压和电网频率,当电压或频率越限时,控制装置根据检测到的电压、频率偏差,调整 U_{ES} 的幅值和相位。当电网电压(频率)偏低时,控制ES进入感性模式,降低非关键负载端电压以及功率,稳定 U_c 及系统频率;当电网电压(频率)偏高时,控制ES进入容性模式,升高非关键负载端电压以及功率,稳定 U_c 及系统频率。随着源-荷供需关系的改善,通过ES的调节,非关键负荷的供电亦会趋于正常。

由图1可知:

$$U_s = U_c + I_s(R_1 + j\omega L_1) \quad (1)$$

$$U_c = U_{nc} + U_{ES} \quad (2)$$

$$I_s = I_{nc} + I_c \quad (3)$$

图1中各部分的功率关系如下:

$$\tilde{S}_s = U_s \tilde{I}_s = U_c \tilde{I}_c + U_{nc} \tilde{I}_{nc} + U_{ES} \tilde{I}_{nc} + (U_s - U_c)(\tilde{I}_{nc} + \tilde{I}_c) \quad (4)$$

其中, $\tilde{S}_s$ 为电源复功率; $\tilde{I}_s$ 为各电流的共轭相量。

设图1中电源功率通过逆变器输出,则有:

$$\begin{cases} P_{PCC} = \left[R_1 (U_s - U_c \cos \theta_{U_c}) - \omega L_1 U_c \sin \theta_{U_c} \right] \frac{U_c}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \\ Q_{PCC} = \left[\omega L_1 (U_s - U_c \cos \theta_{U_c}) + R_1 U_c \sin \theta_{U_c} \right] \frac{U_c}{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中, θ_{U_c} 为 U_c 的相角; U_s 、 U_c 分别为电源、关键负载电压幅值。

因低压线路的 $\omega L_1 \ll R_1$,忽略 ωL_1 ,则 $\cos \theta_{U_c} = 1$, $\sin \theta_{U_c} = \theta_{U_c}$,式(5)可简化为:

$$P_{PCC} = \frac{(U_s - U_c)U_c}{R_1} = \frac{(U_s - U_{nc} - U_{ES})U_c}{R_1} \quad (6)$$

$$Q_{PCC} = U_c^2 \theta_{U_c} / R_1 \quad (7)$$

经上述分析得出,改变ES输出电压的幅值与相位,便可调节电源输出电压的幅值与频率。

1.2 带Z源网络ES的结构与特点

在直流电压源与逆变器直流侧之间接入Z源网络,便构成如图2所示的带Z源网络的ES拓扑。图中, U_i 为Z源网络的输出电压; C_1 、 C_2 和 L 、 L_2 分别为Z源网络的储能电容和滤波电感。

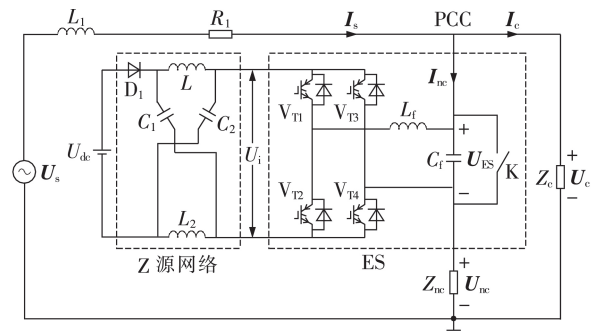


图2 带Z源网络的ES拓扑

Fig.2 Topology of ES with Z-source network

Z源逆变器除了具有传统逆变器的有效逆变状态及零状态外,还增加了允许逆变桥臂瞬时短路的短路直通状态。Z源逆变器不必对PWM设置死区时间,故能有效减小输出波形畸变,提高电能质量。

由图2可见,Z源网络为对称结构,Z源网络中电容电压 U_{C1} 、 U_{C2} 以及电感电压 U_{L1} 、 U_{L2} 有如下关系:

$$U_{C1} = U_{C2} = U_{C0} \quad (8)$$

$$U_{L1} = U_{L2} = U_{L0} \quad (9)$$

在桥臂的一个开关周期 T 内, 直通状态的时间为 T_0 , 有效逆变状态时间 $T_1 = T - T_0$, 可得:

$$2U_{C0} = 2U_{L0} = U_{dc}, \quad U_i = 0 \quad (10)$$

$$U_{C0} + U_{L0} = U_{dc}, \quad U_i = U_{C0} - U_{L0} \quad (11)$$

在一个开关周期 T 内, 电感两端的平均电压 $\bar{U}_{L0}$ 在稳态下必然为0, 即:

$$\bar{U}_{L0} = T_0 U_{C0} + T_1 (U_{C0} - U_{dc}) = 0 \quad (12)$$

联立式(8)~(12)可解得:

$$U_i = U_{C0} - U_{L0} = 2U_{C0} - U_{dc} \quad (13)$$

$$U_{C0} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} U_{dc} = \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} U_{dc}, \quad D_0 = T_0 / T \quad (14)$$

Z源网络输出端峰值电压 $\hat{U}_i$ 与直流电源电压 U_{dc} 的关系式为:

$$\hat{U}_i = \frac{T}{T_1 - T_0} U_{dc} = B U_{dc} \quad (15)$$

$$B = \frac{T}{T_1 - T_0} \geq 1 \quad (16)$$

其中, B 为直流调压因子。若 $B=1$, 则Z源网络丧失短路直通状态。本文使用Z源网络的目的是使逆变桥臂获得短路直通状态, 降低ES输出电压的畸变程度, 若设置 B 值较大, 在ES临近退出时需调制更小的逆变控制占空比, 逆变输出电压更易产生畸变, 因此设定 $B=1.1$ 。

2 情感控制模型分析与简化

情感控制模型的结构示意图如图3所示。

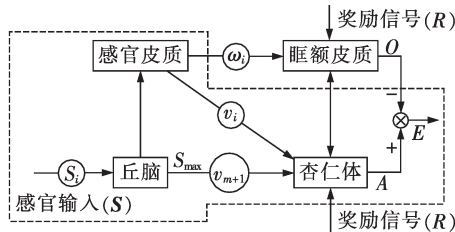


图3 情感控制结构图

Fig.3 Structure of BELBIC

丘脑将感官输入的信号 $S=[S_1, S_2, \dots, S_m]$ 送入感官皮质进行加工, 经与不同权值相乘后分别传递给杏仁体和眶额皮质, 此外, 对于接收的最大信号 $S_{\max}$, 丘脑还直接将其传递到杏仁体。杏仁体对2类信号的处理使情感控制具有变结构特性, 处理问题时可在快和稳之间做出合理协调。模型的输出为:

$$E = A - O = \sum_{i=1}^m (v_i - \omega_i) S_i + v_{m+1} S_{\max} \quad (17)$$

其中, v_i 和 ω_i 分别为杏仁体和眶额皮质的可调权值; 杏仁体输出 $A = \sum_{i=1}^m v_i S_i + v_{m+1} S_{\max}$; 眶额皮质输出 $O =$

$$\sum_{i=1}^m \omega_i S_i。$$

模型通过实时调整权值 v_i 和 ω_i 来模拟学习过程, 具体表达式为:

$$\Delta v_i = a_v S_i \max(0, R - A) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$\Delta v_{m+1} = a_v S_{\max} \max(0, R - A) \quad (19)$$

$$\Delta \omega_i = a_\omega S_i (E - v_{m+1} S_{\max} - R) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

其中, a_v 和 a_ω 分别为杏仁体和眶额皮质的学习率; 奖励信号 $R = \sum_{i=1}^m r_i S_i + r_{m+1} E$, r_i 为可调权值。

从式(18)可看出, Δv_i 的正负符号始终与 S_i 保持一致; 而眶额皮质用于抑制和修正杏仁体的学习过程, 从式(20)可看出, $\Delta \omega_i$ 可正负取值。

考虑到情感控制主要由杏仁体起调节和记忆作用, 且控制器参数也主要受杏仁体权值的影响, 眶额皮质用于抑制与修正杏仁体的学习过程, 因而可去除模型的眶额皮质, 并隐藏奖励信号。去除眶额皮质后, 其输出 $O=0$, 情感控制模型的输出简化为:

$$E = A = \sum_{i=1}^m v_i S_i + v_{m+1} S_{\max} \quad (21)$$

$$\text{则 } R - A = \sum_{i=1}^m (r_i + r_{m+1} v_i - v_i) S_i + (r_{m+1} - 1) v_{m+1} S_{\max},$$

因此, 可令 $r_i + r_{m+1} v_i - v_i = 0$, $(r_{m+1} - 1) v_{m+1} = 1$, 求得:

$$\begin{cases} r_i = v_i (1 - r_{m+1}) \\ r_{m+1} = 1/v_{m+1} + 1 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

使 $R - A = S_{\max}$ 成立, 达到隐藏奖励信号的目的。情感控制模型亦即简化成图3中虚框部分。

令 S 包括控制量的偏差 e 及其积分:

$$S = [S_1 \ S_2] = [s_1 e \ s_2 \int e dt] \quad (23)$$

其中, s_1, s_2 为感官输入信号的权重调节系数。

从丘脑直接传递至杏仁体的最大信号为:

$$S_{\max} = \max(S_1, S_2) \quad (24)$$

由式(21)可得其输出 E 为:

$$E = v_1 S_1 + v_2 S_2 + v_3 S_{\max} = v_1 s_1 e + v_2 s_2 \int e dt + v_3 \max(s_1 e, s_2 \int e dt) \quad (25)$$

其中, v_1, v_2, v_3 为简化情感控制的参数。杏仁体的权值调整表达式则变为:

$$\Delta v_i = a_v S_i \max(0, s_1 e, s_2 \int e dt) \quad i = 1, 2, 3 \quad (26)$$

由式(25)和式(26)可看出, 简化情感控制器既具有PI结构, 又具有参数的自学习能力。当控制开始时, 感官输入的比例信号远大于积分信号, 模型按 $(v_3 + v_1) s_1 e + v_2 s_2 \int e dt$ 控制, 加快初始调节速度; 随着时间推移, 感官输入的比例信号远大于积分信号, 模型按 $(v_3 + v_2) s_2 \int e dt + v_1 s_1 e$ 控制, 提高调节精度。

简化情感控制的实现步骤如下:①参数初始化,即设定感官输入信号的权重调节系数 s_1, s_2 ,杏仁体结构内初始权值 $v_1=v_2=v_3=1$,以及杏仁体结构内权值学习率 a_v ;②将式(23)的感官输入信号量 S 送入丘脑;③根据式(26)计算控制器参数的调节律 $\Delta v_1, \Delta v_2$ 和 Δv_3 ;④根据式(25)计算简化情感控制器的输出信号 E ,并输入控制装置;⑤若到达给定终止条件,则控制器停止运行,否则返回步骤②,控制器继续运行。

3 ES控制装置设计

3.1 带Z源网络的ES控制系统原理分析

针对低压微电网,基于简化情感控制、使用单个ES同时稳压稳频的控制系统框图如图4所示。控制系统可分为频率控制环节、逆变控制环节和Z源电压控制环节3个环节。附录中图A2为ES稳压稳频的流程图。

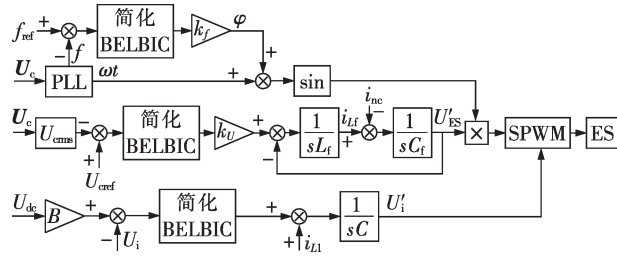


图4 基于简化情感控制器的ES稳压稳频控制框图

Fig.4 Control block diagram of voltage and frequency stabilization for ES based on simplified BELBIC

(1)频率控制环节。对 U_c 实时采样,通过锁相环(PLL)获得该时刻 U_c 的相位 ωt 和系统频率 f ,求取频率参考值 f_{ref} 与实测值 f 之差 $\Delta f = f_{ref} - f$,并通过该环节的简化情感控制器得到频率的初步控制量,乘以频率的周期值 $k_f = 2\pi$,得到相位偏移量 φ ,再与 U_c 的相位相加后产生ES的控制相位。

(2)逆变控制环节。求取关键负载电压参考值 U_{cref} 与实测值 U_{cms} 之差 $\Delta U_c = U_{cref} - U_{cms}$,并通过该环节的简化情感控制器得到电压幅值的控制量,乘以增益系数 k_u ,并算得电感电流 i_{Lf} ,再经过电流环得到用于调制逆变控制信号的电压幅值 U'_{ES} 。 U'_{ES} 乘以 $\sin(\omega t + \varphi)$ 产生调制 U_{ES} 的交流电压信号 U'_{ES} 。

(3)Z源电压控制环节。采用电容电压作为控制外环,求取Z源输出电压参考值 BU_{dc} 与实测值 U_i 之差 $\Delta U_i = BU_{dc} - U_i$,经过该环节的简化情感控制器得到 U_i 的控制量;为提高直流侧控制精度,将电感电流 i_{L1} 送入控制内环,产生用于调制Z源网络电压 U_i 的直流电压信号 U'_i 。正弦脉宽调制(SPWM)模块分别将 U'_i 和 U'_{ES} 调制成控制桥臂的高频脉冲并做或运算,驱动逆变桥臂通断,形成所需的 U_i 和 U_{ES} 。

3.2 控制器参数优化与稳定性测试

本文借助 MATLAB / Simulink 中的 Signal Constraint 模块优化简化情感控制器的参数。

ES 逆变控制环节硬件部分的传递函数为:

$$G(s) = 1/(L_f C_f s^2 + 1) \quad (27)$$

基于式(27)构建如附录中图A3所示的情感控制器的控制模型。经优化后,逆变控制环节中简化情感控制器的参数如下:感官输入信号的权重调节系数为 $s_{11}=0.1131, s_{12}=10.4737$;杏仁体和眶额皮质的学习率分别为 $a_{v1}=14.9628, a_{\omega 1}=10.1549$;奖励信号权值为 $r_{11}=0.1119, r_{12}=0.1336, r_{13}=0.2156$ 。同理,对频率控制环节进行优化,得到的参数为: $s_{21}=0.5512, s_{22}=15.0650; a_{v2}=5.3423, a_{\omega 2}=3.3691; r_{21}=0.2163, r_{22}=0.1153, r_{23}=0.1167$ 。对Z源电压控制环节中的简化情感控制器的参数进行优化,得到的参数为: $s_{31}=3.0120, s_{32}=12.0330, a_{v3}=7.1597, a_{\omega 3}=5.7977, r_{31}=0.1958, r_{32}=0.2227, r_{33}=0.1833$ 。

采用优化后的控制参数对图A3所示的控制模型进行阶跃响应测试,结果如图5所示。可以看出,基于简化情感控制的控制系统具有响应速度快、运行稳定的特性。

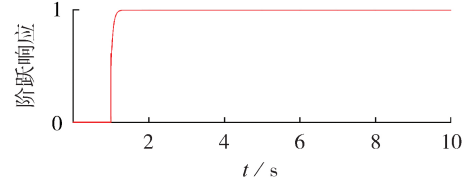


图5 阶跃响应曲线

Fig.5 Step response curve

4 仿真分析

本文基于图2利用 MATLAB / Simulink 仿真平台搭建了仿真模型,对ES拓扑中的逆变器进行谐波分析,对所提出的基于简化情感控制的ES稳压稳频方法进行动态仿真验证,并与基于相同参数的PI控制及情感控制的ES稳压稳频方法进行对比。微电网处于孤岛模式,算例参数如附录中表A1所示。

4.1 谐波分析

设Z源网络输出电压为100V,观察Z源网络退出与接入时逆变器输出电压的谐波状况,如图6所示。从图6可以看出,当Z源网络退出时,2—5、7次谐波含量分别为0.9%、1.4%、0.4%、1.2%、0.15%,总的交流电压谐波含量为2.59%;而Z源网络接入后,各次谐波含量大幅下降,总的交流电压谐波含量降低至1.06%。

4.2 ES仿真验证

线路额定电压为220V,电网额定频率为50Hz,设电压允许偏差为额定电压的 $\pm 5\%$,频率允许偏

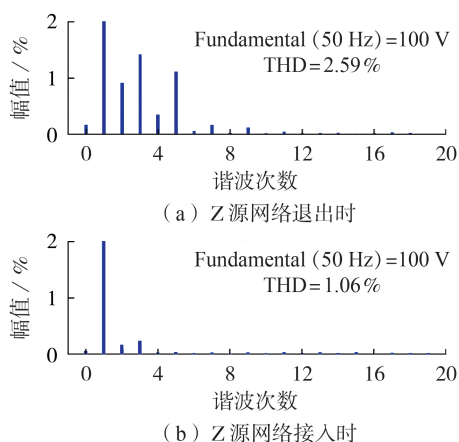


图6 逆变器的幅频特性

Fig.6 Amplitude and frequency characteristics of inverter

差为 ± 0.2 Hz。仿真过程为:0.5 s前电源正常出力,0.5 s时出力减少/增加20%,ES检测到频率和电压波动越限后自动投入。观察电源出力下降和上升时,基于PI控制、情感控制和简化情感控制的ES投入后电网频率及负载电压的变化情况,仿真结果分别如图7和附录中图A4所示。

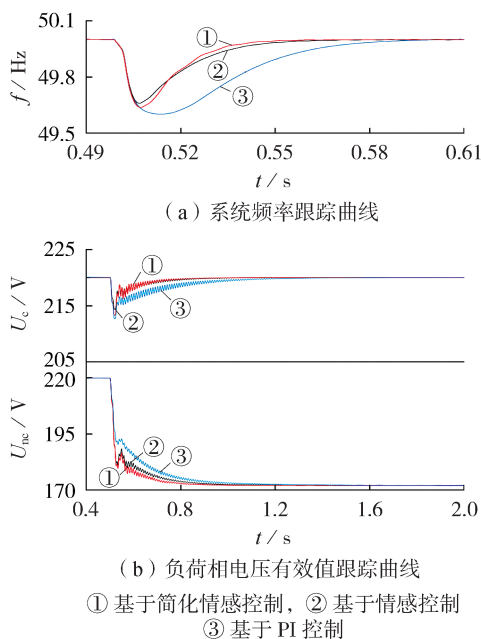


图7 电源出力下降时的仿真结果

Fig.7 Simulative results when new energy output drops

从图7仿真结果可看出,0.5 s时由于电源出力降低,关键负荷电压降至213 V左右,系统频率降至49.6 Hz。ES自动投入,迅速调整非关键负荷的电压及功率,使关键负荷电压回升至220 V,电网频率回升至50 Hz,此时非关键负荷的电压降至172 V。其中,ES采用PI控制时,频率经过0.1 s后恢复为50 Hz,关键负荷电压经过0.45 s后恢复为220 V;ES采用情感控制时,频率经过0.065 s后恢复为50 Hz,关键负

荷电压经过0.25 s后恢复为220 V;ES采用简化情感控制时,频率经过0.06 s后恢复为50 Hz,关键负荷电压经过0.25 s后恢复为220 V。

基于情感控制或简化情感控制的ES,因其所具有的变结构特性和自学习能力,模型起始输出量大,调控速度明显快于PI控制的ES;控制伊始,模型输出 $E=0$,情感控制模型在控制初期 $\Delta\omega_i < 0$,根据式(17),其起始输出量大于简化情感控制模型,对频率和电压变化的抑制能力稍强于简化情感控制;随着时间的推移, $\Delta\omega_i > 0$,情感控制模型的输出小于简化情感控制模型,控制速度放慢。总体上看,情感控制模型与简化情感控制模型的控制速度和精度相近,而简化情感控制在减少多个整定参数的前提下仍能保证良好的控制效果。

由图A4可看出,电源出力上升时ES调节过程与电源出力降低时类似,限于篇幅不再赘述。

5 ES实验验证

基于dSPACE实验平台搭建了如附录中图A5所示的ES进行验证,实验参数如附录中表A2所示。

实验过程中,2.5 s时电源出力下降20%,ES检测到电压、频率下降后自动启动调节。基于简化情感控制ES的稳频稳压结果如图8所示,而基于PI控制ES的稳频稳压结果如图9所示。

从图8和图9的实验结果可以看出,2.5 s时由于电源出力降低,微网供需不平衡,系统频率降低至49.65 Hz,关键负荷峰值电压降至37 V左右。ES自动投入,迅速调整非关键负荷的电压以及功率,使得关键负荷峰值电压回升至42 V,电网频率回升至50 Hz,此时非关键负荷的峰值电压降至32 V。其

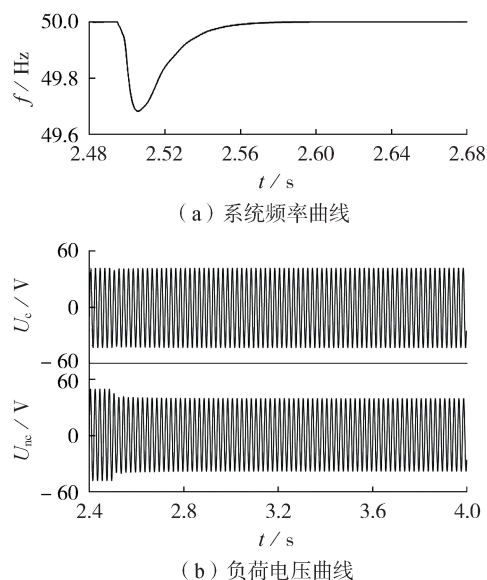


图8 电压、频率下降时基于简化情感控制的ES控制结果

Fig.8 Control results of ES based on simplified BELBIC when voltage and frequency drop

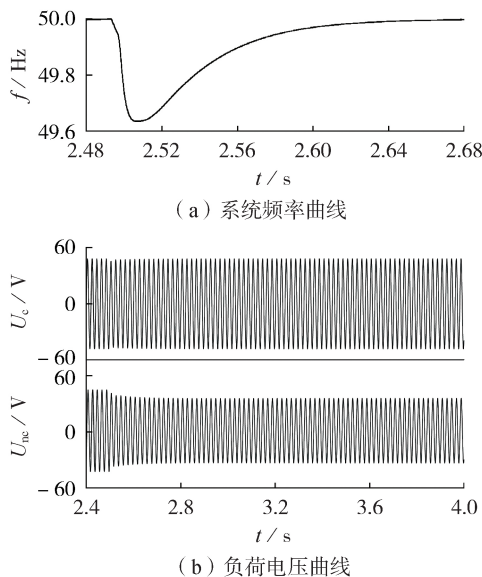


图9 电压、频率下降时基于PI控制的ES控制结果

Fig.9 Control results of ES based on PI control when voltage and frequency drop

中,ES采用PI控制时,频率经过0.16 s后恢复为50 Hz,关键负荷峰值电压经过0.15 s后恢复为42 V;ES采用简化情感控制时,频率经过0.08 s后恢复为50 Hz,关键负荷峰值电压经过0.08 s后恢复为42 V。

电源出力上升20%时的实验结果与下降时的实验结果类似,仅列出本文方法的实验结果,如附录中图A6所示。

上述实验证明,基于简化情感控制的ES能有效稳定电网频率和电压,且控制效果优于基于PI控制的ES。

6 结论

本文提出了一种基于简化情感算法、带Z源网络的ES稳压稳频方法,设计了使用ES进行稳压稳频的控制方案。通过系统仿真与实验验证得到以下结论:

(1)基于简化情感算法的ES控制策略可以有效地缓解电网的电压和频率波动,维持关键负载的电压及电网频率稳定;

(2)可利用1个ES同时稳定微电网的电压和频率;

(3)Z源网络可以有效降低ES输出电压的谐波含量;

(4)相比常用的PI控制,ES采用简化情感控制时,电网频率及电压调节时间更短,稳压稳频波形振荡程度更小。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 杨占刚,徐玉磊,王成山,等. 光储微电网运行特性及影响因素

分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):15-20.

YANG Zhangang, XU Yulei, WANG Chengshan, et al. Operating characteristics and influencing factors of photovoltaic-storage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):15-20.

[2] 熊雄,王江波,井天军,等. 微电网群功率优化控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):10-17.

XIONG Xiong, WANG Jiangbo, JING Tianjun, et al. Power optimization control of microgrid cluster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9):10-17.

[3] 郝雨辰,吴在军,窦晓波,等. 基于IEC61850的多代理系统在微电网运行控制中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):139-146.

HAO Yuchen, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Application of IEC61850-based multi-agent system in microgrid operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):139-146.

[4] 李朝东,宋慧慧,曲延滨,等. 孤岛运行方式下微电网储能系统能量成型控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):48-55.

LI Chaodong, SONG Huihui, QU Yanbin, et al. Strategy of energy-shaping control for microgrid energy storage system in islanding operation mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10):48-55.

[5] 鲁斌,刘雪艳. 基于MAS和CA的多微电网孤岛模式下无功电压的控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):6-14.

LU Bin, LIU Xueyan. Reactive power and voltage control based on MAS and CA for islanded multi-microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):6-14.

[6] SIMPSON-PORCO J W, DORFLER F, BULLO F. Voltage stabilization in microgrids via quadratic droop control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(3):1239-1253.

[7] IYER S V, BELUR M N, CHANDORKAR M C. Analysis and mitigation of voltage offsets in multi-inverter microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1):354-363.

[8] 田梁玉,唐忠,田晨,等. 基于状态跟随器的微电网平滑切换研究[J]. 电网技术,2017,41(4):277-282.

TIAN Liangyu, TANG Zhong, TIAN Chen, et al. Research of microgrid seamless switching based on state follower[J]. Power System Technology, 2017, 41(4):277-282.

[9] 施琳,罗毅,施念,等. 高渗透率风电-储能孤立电网控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):78-85.

SHI Lin, LUO Yi, SHI Nian, et al. A control strategy of isolated grid with high penetration of wind and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):78-85.

[10] 朱兰,严正,杨秀,等. 计及需求侧响应的微网综合资源规划方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2621-2628.

ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Integrated resources planning in microgrid based on modeling demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2621-2628.

[11] 曾博,杨雍琦,段金辉,等. 新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):10-18.

ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues and research prospects for demand-side response in alternate electrical power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17):10-18.

[12] SHU Y H, CHI K L, WU F F. Electric springs—a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1552-1561.

[13] 罗登,林宏健,舒泽亮. 单相二极管箝位三电平逆变器死区时间补偿技术[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):147-151.

LUO Deng, LIN Hongjian, SHU Zeliang. Dead time compensa-

- tion technology of single-phase diode-clamped three-level inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 147-151.
- [14] 张继元, 舒杰, 王浩, 等. 基于电流矢量的三电平逆变器死区补偿策略[J]. 太阳能学报, 2018, 39(6): 1637-1645.
ZHANG Jiyuan, SHU Jie, WANG Hao, et al. Dead-time compensation strategy based on current vector for three-level inverter[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(6): 1637-1645.
- [15] PENG F Z. Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 504-510.
- [16] PILEHVAR M S, MARDANEH M, RAJAEI A. Formulation of phase voltage and calculation of its total harmonic distortion in multilevel Z-source inverter[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(8): 1509-1518.
- [17] MA G, XU G, CHEN Y, et al. Voltage stability control method of electric springs based on adaptive PI controller[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 95: 202-212.
- [18] JAVAID M S, IRSHAD U B, HUSSEIN A E, et al. A novel fuzzy logic controller for smart load voltage regulation[C]// 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). Santa Margherita Ligure, Italy: [s.n.], 2017: 620-624.
- [19] CHEN X, HOU Y, TAN S C, et al. Mitigating voltage and frequency fluctuation in microgrids using electric springs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 508-515.
- [20] CHEN J, YAN S, YANG T B, et al. Practical evaluation of droop and consensus control of distributed electric springs for both voltage and frequency regulation in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6947-6959.
- [21] YUN Y, TAN S C, HUI S Y. Voltage and frequency control of electric spring based smart loads[C]// 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2016: 3481-3487.
- [22] 涂春鸣, 杨义, 肖凡, 等. 非线性负载下微电网主逆变器输出侧电能质量控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2486-2495.
TU Chunming, YANG Yi, XIAO Fan, et al. The output side power quality control strategy for microgrid main inverter under nonlinear load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2486-2495.
- [23] ROSHANAIE M, VAHEDI E, LUCAS C. Adaptive antenna applications by brain emotional learning based on intelligent controller[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2010, 12(4): 2247-2255.

作者简介:



龙 军

龙 军(1956—),男,广西南宁人,教授,主要研究方向为电力系统检测与控制、分布式发电与微电网技术(**E-mail**: gxnlnj161@163.com);

郑宇琦(1993—),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要研究方向为微电网控制(**E-mail**: zhengyooki@qq.com);

卢 泉(1982—),男,广西玉林人,副教授,博士,主要研究方向为高效光伏发电与储能技术(**E-mail**: luquan@gxu.edu.cn);

周子富(1993—),男,广西贵港人,硕士研究生,主要研究方向为虚拟同步发电机并列运行与控制(**E-mail**: 516229020@qq.com)。

(编辑 李莉)

Voltage and frequency control method of microgrid based on Z-source ES and simplified BELBIC

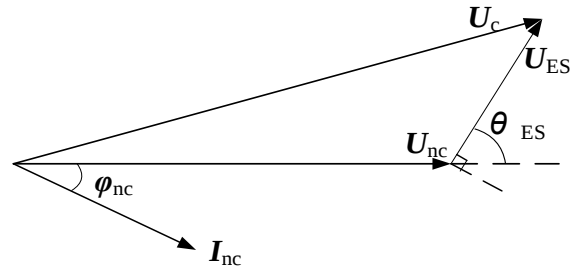
LONG Jun, ZHENG Yuqi, LU Quan, ZHOU Zifu

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

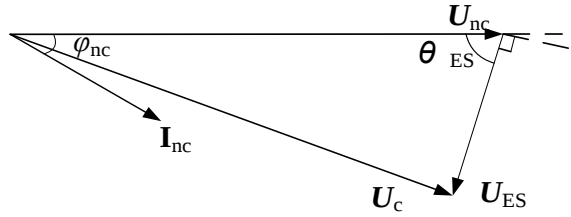
Abstract: In order to reduce the voltage and frequency fluctuation caused by the intermittent output of renewable energy, a voltage and frequency stabilization method of microgrid based on simplified BELBIC (Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller) and Z-source ES (Electric Spring) is proposed. Aiming at the output waveform distortion and increase of harmonic content caused by the dead zone time of ES inverter control, an ES topology structure with Z-source network is designed. By taking advantage of the characteristics of Z-source inverter that allows instantaneous short circuit of bridge arm, the dead zone time of driving signal is eliminated and the harmonic content of ES output voltage is reduced. By analyzing the self-learning process of BELBIC, the model of BELBIC is simplified to remove the structure of the orbitofrontal cortex and hide the reward signal, so as to reduce the parameters needed to be adjusted while ensuring a good control effect. The ES controller based on simplified BELBIC is designed. The simplified BELBIC adjusts the amplitude and phase of ES according to the deviation of critical-load voltage and system frequency, realizing the simultaneous voltage and frequency control with one ES. Simulative and experimental results show that the proposed method has high control accuracy and low ES output voltage harmonic content, and can effectively stabilize the voltage and frequency fluctuation of microgrid.

Key words: microgrid; voltage control; frequency control; electric spring; Z-source network; simplified BELBIC

附录



(a) 感性模式



(b) 容性模式

图 A1 ES 的工作模式

Fig.A1 Working mode of ES

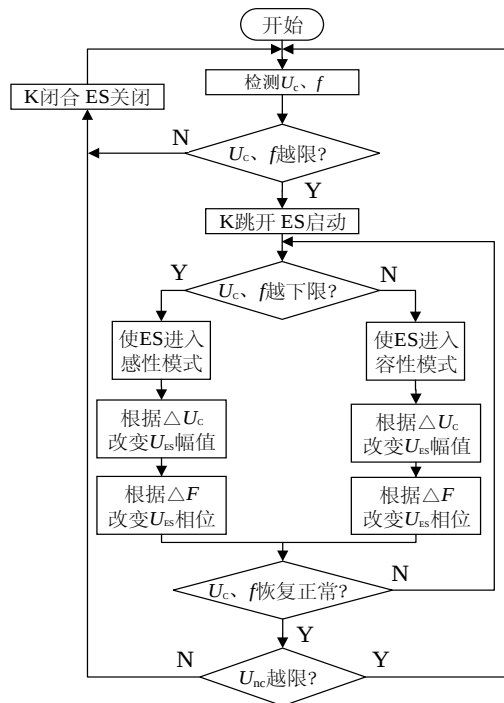


图 A2 电力弹簧稳压稳频策略流程图

Fig.A2 Flowchart of voltage and frequency stabilization strategy for ES

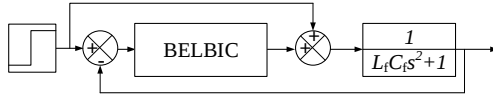


图 A3 情感控制器系统模型

Fig.A3 Model of BELBIC system

表 A1 微网中 ES 仿真模型参数

Table A1 Simulation model parameters of ES in microgrid

参数	数值	参数	数值
电源额定功率/kW	50	开关频率/Hz	10000
关键负载参考电压/V	220	关键负载功率/kW	20(cosφ=0.85)
输电线路电阻/Ω	0.5	非关键负载功率/kW	25(cosφ=0.85)
输电线路电感/mH	≈0	Z 源调整系数B	1.1
滤波器电感/mH	3.3	电压环系数 k_U	10
滤波器电容/μF	45	频率环系数 k_f	2π
逆变环 PI 控制器参数 k_p, k_i	0.1,10	频率环 PI 控制器参数 k_p, k_i	0.55, 15
逆变环 BELBIC 参数 $s_{11}, s_{12}, a_{v1}, a_{o1}, r_{11}, r_{12}, r_{13}$	0.1,10,15,10,0.1,0.1,0.2	频率环 BELBIC 参数 $s_{21}, s_{22}, a_{v2}, a_{o2}, r_{21}, r_{22}, r_{23}$	0.55,15,5,3,0.2,0.1,0.1
Z 源 BELBIC 参数 $s_{31}, s_{32}, a_{v3}, a_{o3}, r_{21}, r_{22}, r_{23}$	3,12,7,6,0.2,0.2,0.2	逆变环简化 BELBIC 参数 s_{11}, s_{12}, a_{v1}	0.1,10,15
频率环简化 BELBIC 参数 s_{21}, s_{22}, a_{v2}	0.55,15,5	Z 源简化 BELBIC 参数 s_{31}, s_{32}, a_{v3}	3,12,7



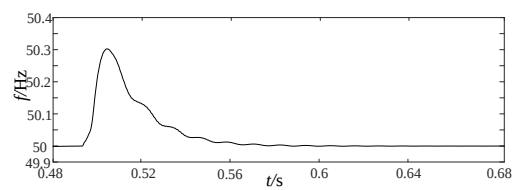
图 A4 ES 实验平台

Fig.A4 Experimental platform of ES

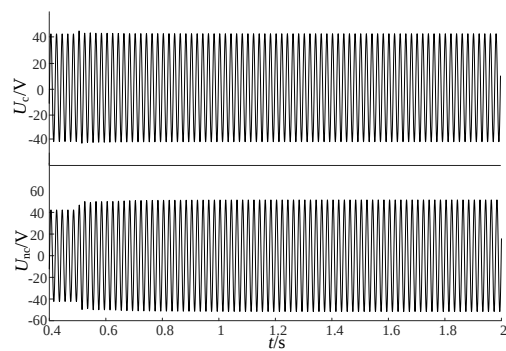
表 A2 ES 及负载实验参数

Table A2 Experimental parameters of ES and loads

参数	数值	参数	数值
电源额定功率/W	80	关键负载参考电压峰值/V	42
输电线路电阻/Ω	0.33	输电线路电感/mH	≈0
ES 滤波器电感/mH	2	ES 滤波器电容/μF	10
关键负载阻抗/Ω	50+j30	非关键负载功率/Ω	20+j45
Z 源电压调整系数B	1.1	电压环增益系数 k_U	10
频率环增益系数 k_f	2π	逆变环 PI 控制器参数 k_p, k_i	0.1,10
频率环 PI 控制器参数 k_p, k_i	0.55, 15	逆变环简化 BELBIC 参数 s_{11}, s_{12}, a_{v1}	0.1,10,15
频率环简化 BELBIC 参数 s_{21}, s_{22}, a_{v2}	0.55,15,5	Z 源简化 BELBIC 参数 s_{31}, s_{32}, a_{v3}	3,12,7



(a) 系统频率曲线



(b) 负荷电压曲线

图 A5 电压、频率上升时基于简化情感控制的 ES 控制结果

Fig.A5 Control results of ES based on simplified BELBIC when voltage and frequency rise