

# 基于二端口阻抗模型的 ES 越限失效机理分析与控制方法

袁敞, 邱俊卿, 戴笃猛

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 电力弹簧(ES)对大量可再生能源发电并网引起的电压波动具有抑制作用,但其只能在一个确定的系统电压波动范围内工作,当系统电压波动较大时,ES 存在越限失效的风险。因此文中首先分析了 ES 的稳态运行范围以及越限失效机理;其次分析了关键负载目标电压值变化对 ES 运行范围的影响;然后基于 ES 的二端口阻抗模型,提出一种系统电压越限后关键负载目标电压计算方法,优化系统电压越限后的关键负载目标电压,有效扩大 ES 的运行范围;最后搭建了三相 ES 仿真模型,验证了所提方法处理 ES 越限问题的有效性。

**关键词:** 系统电压波动; 电力弹簧(ES); 稳定运行范围; 越限失效分析; 关键负载电压优化; 二端口阻抗模型

**中图分类号:** TM72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2022)04-0002-07

## 0 引言

高比例的可再生能源接入电网将引起电网频率波动、电压波动等问题<sup>[1-4]</sup>,影响系统供电质量。对于电网电压波动问题,可以通过增加无功补偿装置<sup>[5]</sup>或者储能装置<sup>[6]</sup>来解决,但无功补偿装置无法调节有功功率,调压能力有限,而储能装置成本高,且会造成环境污染<sup>[7-8]</sup>。

针对上述问题,文献[9—11]提出一种可以稳定交流母线电压的装置——电力弹簧(electric spring, ES)。ES 主要由双向功率变换器、LC 滤波电路和直流侧电容构成<sup>[12]</sup>,可以实现负荷用电量跟随系统发电量的变化而变化<sup>[13]</sup>,为可再生能源发电的友好并网提供新的解决方案。但 ES 有一定的有效工作范围,该范围受关键负载、非关键负载、线路等参数影响。如果系统电压波动超出该范围,则 ES 失效,无法再起到稳压作用,因此诸多学者致力于研究如何扩大 ES 的有效工作范围。文献[14—17]提出用电池或 AC-DC 变换器替代 ES 直流侧电容,使 ES 在进行无功功率补偿的同时可以补偿有功功率,有效扩大 ES 的稳定运行范围,但电池成本过高,而 AC-DC 变换器替代法的接线和控制较复杂;文献[18—20]提出通过优化关键负载电压参考值或调整网络参数进行越限处理,但存在优化过程中物理意义不清晰或网络参数无法在线调整的问题。以上方法虽然都扩大了 ES 的运行范围,但是缺少对 ES 越限失效机理的分析,并且在越限处理方法上存在经济和技术问题。

因此文中分析 ES 的稳态运行范围及其越限失

效机理,提出一种基于 ES 二端口阻抗模型的关键负载最优目标电压获取方法。该方法列出了关键负载电压关于 ES 等效阻抗的方程,可实现系统电压越限后关键负载目标电压的获取,解决了 ES 越限后没有工作点的问题。在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型,验证了该方法处理 ES 越限的有效性。

## 1 ES 工作原理与稳态运行范围

### 1.1 ES 工作原理

ES 结构示意图如图 1 所示,其中虚线框内为三相 ES,由电压源型逆变器和 LC 滤波电路组成。

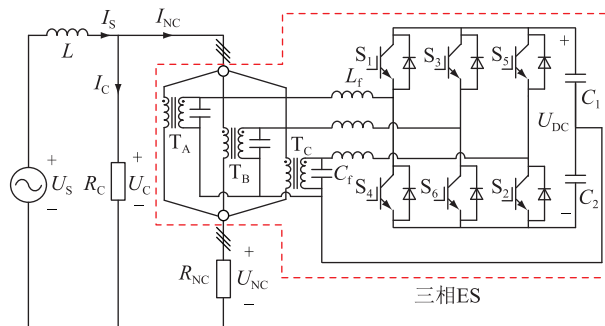


图 1 ES 拓扑结构

Fig.1 The topology of ES

图 1 中,  $R_C, R_{NC}$  分别为关键负载和非关键负载;  $U_s$  为电源电压;  $L$  为线路电感;  $C_f, L_f$  分别为滤波电容和滤波电感;  $T_A, T_B, T_C$  为自耦变压器;  $C_1, C_2$  为 ES 直流侧电容;  $S_1—S_6$  为绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT) 开关;  $I_s$  为流过线路电流;  $I_C$  为流过关键负载电流;  $I_{NC}$  为流过非关键负载电流;  $U_C, U_{NC}$  分别为关键负载和非关键负载电压;  $U_{DC}$  为直流侧电容电压。三相 ES 通过耦合变压器与非关键负载串联形成智能负载<sup>[21-22]</sup>,当系统电压波动时,ES 会改变其输出电压的幅值和相位,将

系统电压波动转移到非关键负载上,从而保证关键负载电压稳定<sup>[23]</sup>。由于 ES 直流侧为电容,因此 ES 在稳态时只能发出或消耗无功功率,使得 ES 输出电压相位与电流相位相差  $90^\circ$ 。在实际应用中,系统电压可能会偏低或者偏高,因此 ES 也相应地具有容性和感性 2 种工作模式,2 种工作模式下的相量图分别如图 2、图 3 所示。

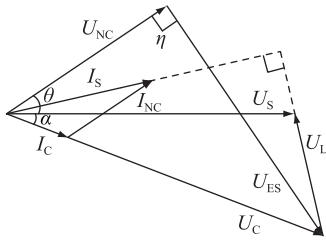


图 2 容性工作模式相量图

Fig.2 Vector diagram under capacitive mode

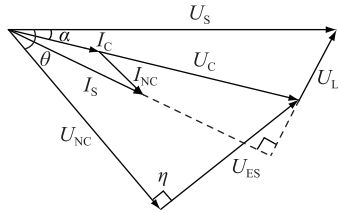


图 3 感性工作模式相量图

Fig.3 Vector diagram under inductive mode

图 2 和图 3 中,  $U_{ES}$  为 ES 输出电压;  $U_L$  为线路电压;  $\alpha, \theta$  分别为关键负载电压和非关键负载电压与系统电压之间的夹角;  $\eta$  为 ES 电压与非关键负载电压之间的夹角。容性工作模式下, ES 发出感性无功功率, 因此其电压相位滞后非关键负载电流相位  $90^\circ$ ; 感性工作模式下, ES 吸收感性无功功率, 其电压相位超前非关键负载电流相位  $90^\circ$ 。

## 1.2 ES 稳态运行范围

可将图 1 简化为由系统节点与关键负载节点构成的两节点系统, 线路功率流向如图 4 所示, 其中  $X_L$  为线路电抗。ES 通过改变线路中有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  来调节线路压降, 从而稳定关键负载节点电压。

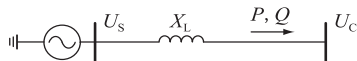


图 4 线路中功率流向

Fig.4 The power flow of the line

线路首末端电压与线路压降的关系如图 5 所示, 其中  $U_x$  为线路压降的横分量;  $U_y$  为线路压降的纵分量。

$$U_x = \frac{QX_L}{U_C} \quad (1)$$

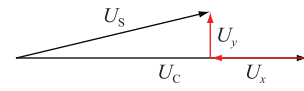


图 5 线路首末端电压关系

Fig.5 Voltage relationship between the head and the end of the line

$$U_y = \frac{PX_L}{U_C} \quad (2)$$

为简化分析, 将关键负载和非关键负载都设置为纯电阻, 因此线路中有功功率为:

$$P = P_C + P_{NC} = \frac{U_C^2}{R_C} + \frac{U_{NC}^2}{R_{NC}} \quad (3)$$

线路中无功功率, 即 ES 输出无功功率为:

$$Q = U_{ES} I_{ES} \sin \eta = U_{ES} \frac{U_{NC}}{R_{NC}} \quad (4)$$

式中:  $I_{ES}$  为 ES 输出电流。

从图 2 和图 3 可以得出:

$$U_{ES}^2 + U_{NC}^2 = U_C^2 \quad (5)$$

而由图 5 可以得到:

$$(U_C - U_x)^2 + U_y^2 = U_S^2 \quad (6)$$

将式(1)一式(5)代入式(6), 可以得到:

$$\left( U_C - U_{ES} X_L \frac{\sqrt{U_C^2 - U_{ES}^2}}{R_{NC} U_C} \right)^2 + \left( \frac{U_C^2}{R_C} + \frac{U_C^2 - U_{ES}^2}{R_{NC}} \right) X_L^2 = U_S^2 \quad (7)$$

其中  $U_C, R_C, R_{NC}, X_L$  已知, 因此可通过式(7)获取 ES 输出电压与系统电压之间的关系曲线。以表 1 所列参数为例分析 ES 稳态运行范围, 其中  $U_{C,rated}$  为关键负载额定电压;  $U_{der}$  为直流侧电压参考值。

表 1 系统参数

Table 1 Parameters of the system			
参数	数值	参数	数值
$R_C/\Omega$	60	$C_f/\mu F$	50
$R_{NC}/\Omega$	15	$L_f/mH$	25
$L/mH$	4	$C_1, C_2/\mu F$	5 000
$U_{C,rated}/V$	220	$U_{der}/V$	800

将表 1 中各参数代入式(7), 即可得到关键负载电压 220 V 时系统电压和 ES 输出电压之间的关系曲线, 如图 6 所示。

图 6 中,  $U_{S,max}, U_{S,min}$  分别为 ES 正常工作时系统电压波动的上限和下限, 其值分别为 229.65 V 和 211.22 V。红色曲线和蓝色曲线分别表示 ES 处于容性工作模式和感性工作模式。可以看到, 在 ES 的运行范围内, 每个系统电压下 ES 都有 2 个稳定

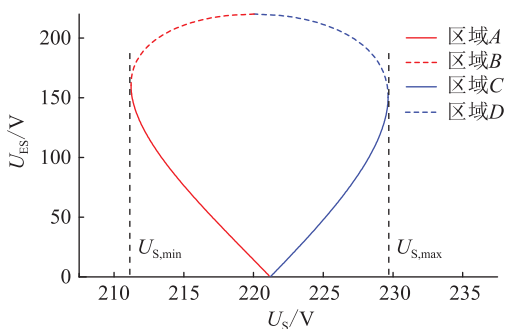


图6 ES 稳定运行范围

Fig.6 Steady state operating range of ES

的工作点,可以根据 ES 输出电压的大小将其分为“大根”区域(区域 B、D)和“小根”区域(区域 A、C)<sup>[24]</sup>。

## 2 ES 越限失效机理分析与解决方案

### 2.1 ES 越限失效机理分析

关键负载电压无法被 ES 稳定在 220 V 时的系统电压称为越限的系统电压,此时 ES 处于越限状态。由图 6 可知,当系统电压满足  $U_{S,min} < U_S < U_{S,max}$  时,ES 存在稳定工作点,否则 ES 无法在关键负载电压为 220 V 的运行曲线上找到稳态运行点。

以 ES 工作于容性“小根”区域(区域 A)为例,分析其越限失效机理。图 7 为 ES 在区域 A 的控制框图,其中  $U_{C,ref}$  为关键负载目标电压; $V_c$  为调制波; $V_{tri}$  为三角波。图 8 为越限后 ES 运行点的变化,其中运行曲线越偏左,关键负载电压越小。

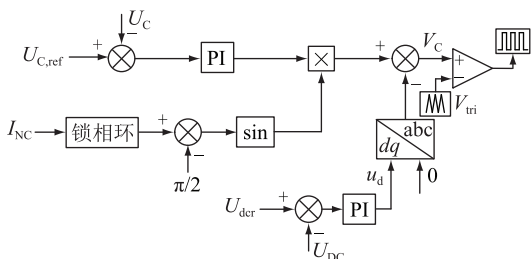


图7 ES 在区域 A 的控制框图

Fig.7 Control block of ES in region A

ES 最初稳定工作于 a 点,若系统电压  $U_S$  降低到  $U_1$ ,则发生系统电压越限,此时关键负载电压  $U_C$  降低,ES 运行点变化到 b 点。

$U_C$  降低后,  $U_{C,ref} - U_C$  为正,即 PI 的输入为正,因此 ES 的电压  $U_{ES}$  增大,ES 运行点由 b 点向上移动,  $U_C$  增大,ES 运行点由 b 点变化到 c 点。

系统电压越限后,关键负载需要的有功功率无法达到其额定值,此时 ES 强制输出有功功率,使得其直流侧电压  $U_{DC}$  降低,当  $U_{DC}$  降低到不足以支撑  $U_{ES}$  继续增大时,  $U_{ES}$  开始减小,ES 运行点从 c 点开

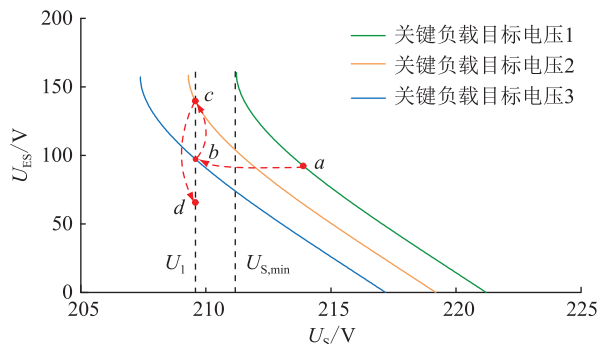


图8 系统电压越限后 ES 运行点变化

Fig.8 Changes of ES operating point after  $U_S$  off-limit

始向 d 点移动。由于  $U_{DC}$  的降低,调制波信号  $V_c$  不断增大,当其幅值超出了载波  $V_{tri}$  的范围时,ES 进入过调制区域而失效。

同理可以分析得到 ES 在区域 B、C、D 发生越限后的失效机理,且 ES 在区域 B 和 C 发生越限后 PI 的输入为负,在区域 D 发生越限后 PI 的输入为正。

综上,当系统电压波动超出 ES 的稳定运行范围后,  $U_C$  无法再被稳定在 220 V,因此 PI 的输入不为 0,且  $U_{DC}$  的降低使得 ES 快速进入到过调制区域,从而无法正常工作。

### 2.2 ES 越限失效解决方案

由 2.1 节可知,当  $U_S$  超出 ES 的稳态运行范围后,在  $U_C$  为 220 V 的 ES 工作曲线上已找不到稳定运行点。通过将关键负载的电压减小或者增大  $\Delta U$ ,可以让 ES 的工作曲线向左或向右移动,从而再次找到稳定运行点。因此当  $U_S$  发生越限后,须对关键负载的电压目标值进行约束,如式(8)所示,其中  $U_S < U_{S,min}$  时取负号,  $U_S > U_{S,max}$  时取正号。

$$U_{C,ref} = U_{C,rated} \pm \Delta U_{min} \quad (8)$$

式中:  $\Delta U_{min}$  为关键负载电压的最小偏移量。由于 ES 在稳态时只发出或者吸收无功功率,因此在求 ES 稳态工作点时可将其等效为电容或电感<sup>[25-26]</sup>,用  $C_{ES}$  和  $L_{ES}$  表示,见图 9。此时可以得到关键负载电压  $U_C$  幅值关于 ES 阻抗  $Z_{ES}$  的函数,即式(9)。

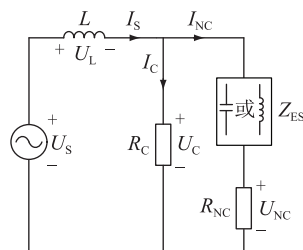


图9 ES 等效电路

Fig.9 Equivalent circuit of ES

$$U_C = \left| U_S \frac{(Z_{ES} + R_{NC})R_C}{(Z_{ES} + R_{NC})(R_C + Z_L) + R_C Z_L} \right| \quad (9)$$

式(9)中,只有  $Z_{ES}$  为变量,其他参数都已知。其中线路阻抗  $Z_L = j\omega L$ , ES 等效阻抗  $Z_{ES}$  为:

$$Z_{ES} = \begin{cases} 1/(j\omega C_{ES}) & \text{容性模式} \\ j\omega L_{ES} & \text{感性模式} \end{cases} \quad (10)$$

因此包含系统电压越限情况的关键负载参考电压设置方法为:

$$U_{C,ref} = \begin{cases} U_{C,max} & U_S < U_{S,min} \\ 220 \text{ V} & U_{S,min} \leq U_S \leq U_{S,max} \\ U_{C,min} & U_S > U_{S,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $U_{C,min}$ ,  $U_{C,max}$  分别为关键负载目标电压的最小值和最大值。当系统电压低于  $U_{S,min}$  或高于  $U_{S,max}$  时,通过式(11)选择关键负载的目标电压就可以保证式(8)中的  $\Delta U_{min}$  为最小。加入关键负载目标电压约束后,系统电压发生越限时 ES 运行点的变化情况如图 10、图 11 所示。

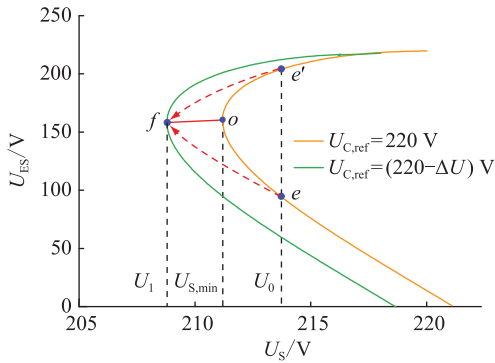


图 10  $U_C$  减小后 ES 运行范围

Fig.10 Operating range of ES after  $U_C$  decrease

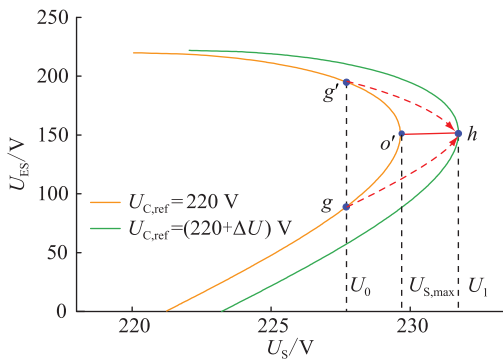


图 11  $U_C$  增大后 ES 运行范围

Fig.11 Operating range of ES after  $U_C$  increase

在图 10 中,系统电压最开始为  $U_0$ ,此时 ES 稳定工作于容性“小根” $e$  点或者“大根” $e'$  点。当系统电压降低到  $U_1$  时,通过将关键负载的目标电压减小  $\Delta U$ ,可以让 ES 的运行曲线向左移动。当移动的 ES 运行曲线与  $U_1$  所在直线相切时,即可保证减小的  $\Delta U$  为最小,此时 ES 的运行点变化到  $f$  点。线段  $of$  为系统电压发生容性越限后 ES 的运行曲线。

图 11 中,系统电压最开始为  $U_0$ ,此时 ES 稳定工作于感性“小根” $g$  点或者“大根” $g'$  点。当系统电压升高到  $U_1$  时发生感性越限,将关键负载的目标电压增大  $\Delta U$ ,可以让 ES 的运行曲线向右移动。当移动的 ES 运行曲线与  $U_1$  所在直线相切时,即可保证增大的  $\Delta U$  为最小,此时 ES 的运行点变化到  $h$  点。线段  $oh$  为系统电压发生感性越限后 ES 的运行曲线。

### 2.3 ES 越限控制方法

ES 在 4 个运行区域内的控制框图如图 12 所示。其中  $K_1, K_2$  为控制 ES 工作于不同区域的切换开关,具体工作区域与相应的开关取值如表 2 所示。

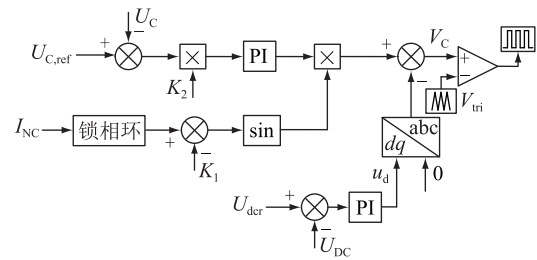


图 12 ES 控制框图

Fig.12 Control block of ES

表 2 开关取值

Table 2 Values of the switch

开关	区域 A	区域 B	区域 C	区域 D
$K_1$	$\pi/2$	$-\pi/2$	$\pi/2$	$-\pi/2$
$K_2$	1	-1	1	-1

在实际控制中为了防止系统电压越限后 ES 运行在边界处,须进一步处理关键负载目标电压  $U_{C,ref}$ :  $U_S < U_{S,min}$  时,  $U_{C,ref} = U_{C,max} - 0.5$ ;  $U_S > U_{S,max}$  时,  $U_{C,ref} = U_{C,min} + 0.5$ 。

### 3 越限控制仿真验证

为验证上述方法处理 ES 越限问题的正确性,基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建三相 ES 仿真模型,仿真参数设置见表 1,此时 ES 运行的下边界  $U_{S,min}$  为 211.22 V,上边界  $U_{S,max}$  为 229.65 V。因此在仿真中共设置 5 个系统电压等级,分别为 214 V(①), 209 V(②), 216 V(③), 226 V(④), 231 V(⑤)。

#### 3.1 “小根”工作模式下越限仿真结果

ES 在“小根”工作模式下越限前后各电压有效值以及 ES 输出电压波形如图 13 和图 14 所示。

从图 13 可以看出,当  $U_S$  从①变到②时,ES 发生容性越限,关键负载电压也随之降低,此时 ES 的容性越限控制开始作用,将关键负载电压稳定在其最优目标电压处。从图 14(a)可看出发生容性越限

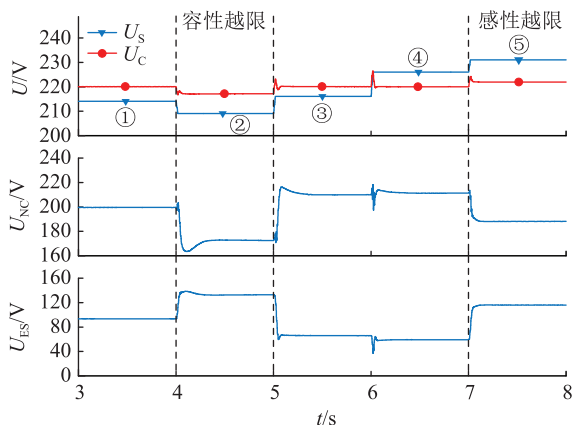


图 13 “小根”工作模式下越限电压有效值

Fig.13 RMS value of the voltage after off-limit under small operating mode

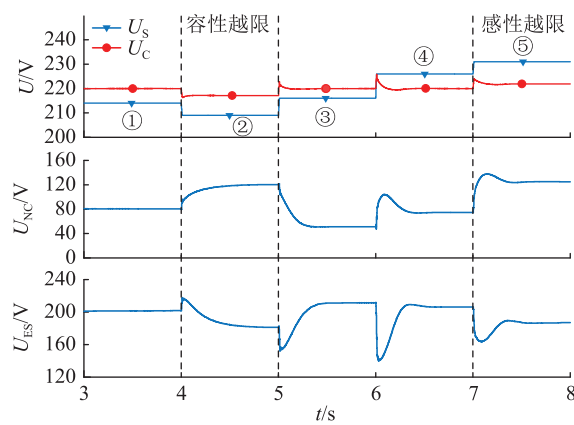


图 15 “大根”工作模式下越限电压有效值

Fig.15 RMS value of the voltage after off-limit under big operating mode

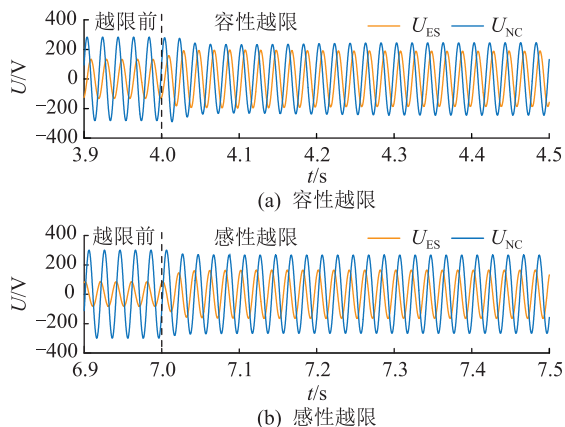


图 14 “小根”工作模式下越限前后电压波形

Fig.14 Waveforms of the voltage after off-limit under small operating mode

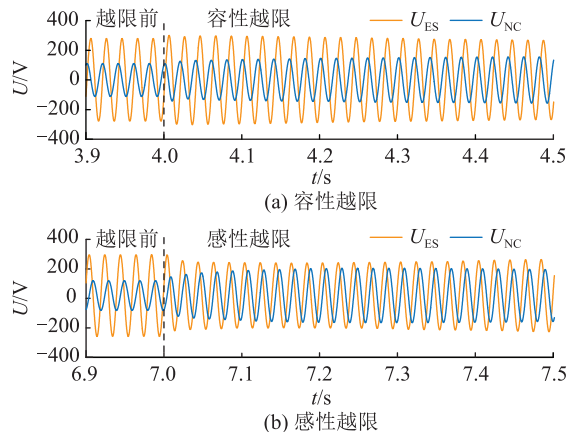


图 16 “大根”工作模式下越限前后电压波形

Fig.16 Waveforms of the voltage after off-limit under big operating mode

前后,  $U_{ES}$  和  $U_{NC}$  之间的相位差未发生改变, 仍为  $U_{ES}$  相位滞后  $U_{NC}$  相位  $90^\circ$ , 可见 ES 在容性超限后仍能正常工作。

当  $U_s$  从④变到⑤时, ES 发生感性超限, 关键负载电压也随之升高, 此时 ES 感性超限控制开始作用, 将关键负载电压稳定在其最优目标电压处。从图 14(b) 可看出发生感性超限前后,  $U_{ES}$  和  $U_{NC}$  之间的相位差未发生改变, ES 仍可以正常工作。

### 3.2 “大根”工作模式下越限仿真结果

同样, 通过改变切换  $K_1$  和  $K_2$ , 让 ES 工作于“大根”模式, 得到 ES 越限前后各电压有效值以及 ES 输出电压波形如图 15 和图 16 所示。

从图 15 可以看出, 与“小根”工作模式下的结果一样, 在 ES 发生容性超限和感性越限时, 关键负载电压会随之降低或者升高, 此时 ES 的容性超限控制或者感性超限控制就会作用, 将关键负载电压稳定在最优目标电压附近。与“小根”工作模式不同的是, “大根”模式下的 ES 电压  $U_{ES}$  较大, 相应的

非关键负载电压  $U_{NC}$  较小, 因此非关键负载消耗的有功功率较小, 有利于频率的稳定。由图 16 可以看出, 在“大根”工作模式下, 越限前后  $U_{ES}$  和  $U_{NC}$  的相位差也未发生变化, ES 仍可以正常工作。

综上, 在系统电压超出 ES 的运行范围后, 通过增加关键负载目标电压约束, 可将关键负载电压稳定在最优值处, 并保证 ES 的正常工作。

## 4 结论

针对系统电压波动较大导致 ES 无法正常工作的问题, 首先分析了 ES 的稳态运行范围以及越限失效的机理, 然后提出一种基于 ES 二端口阻抗模型获取关键负载最优目标电压的方法。该方法可以在不改变 ES 直流侧结构的前提下有效扩大 ES 的运行范围, 保证关键负载和 ES 在系统电压越限后仍能正常工作, 具有经济和技术优势, 结论如下:

(1) 当系统电压波动超出 ES 的稳态运行范围后, ES 快速进入到过调制区域, 失去稳压的作用。

(2) 系统电压波动超出ES的运行范围后,关键负载电压已不能被稳定在其额定值,而通过将ES等效为阻抗模型,可快速获取系统电压越限后关键负载的最优目标电压,有效扩大ES的运行范围。

#### 参考文献:

- [1] 王伟胜. 我国新能源消纳面临的挑战与思考[J]. 电力设备管理, 2021(1): 22-23.  
WANG Weisheng. China's challenges and considerations regarding new energy consumption[J]. Electric Power Equipment Management, 2021(1): 22-23.
- [2] 董新伟, 裴晨晨, 邓薇, 等. 含新能源接入的配电网中分布式储能系统控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(5): 81-89.  
DONG Xinwei, PEI Chenchen, DENG Wei, et al. Research on control strategy of distributed energy storage system in distribution network with new energy[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 81-89.
- [3] 禹红, 夏向阳, 彭梦妮, 等. 基于虚拟同步电机技术的混合储能平抑电网频率波动策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 47-54.  
YU Hong, XIA Xiangyang, PENG Mengni, et al. Research on strategy of micro-grid frequency control in hybrid energy storage system based on virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 47-54.
- [4] 肖浩, 裴玮, 邓卫, 等. 分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S1): 203-213.  
XIAO Hao, PEI Wei, DENG Wei, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network voltage and its optimal control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 203-213.
- [5] 刘华志, 李永刚, 王优胤, 等. 无功电压优化对新能源消纳的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S2): 646-653.  
LIU Huazhi, LI Yonggang, WANG Youyin, et al. Influence about reactive power voltage optimization on the dissipation of new energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 646-653.
- [6] 李建林. 双碳目标下储能系统关键技术及应用[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 1.  
LI Jianlin. Key technologies and applications of energy storage systems under the goal of carbon peak and neutrality[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 1.
- [7] 邵振, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 柔性配电网背景下的储能应用研究评述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 86-93.  
SHAO Zhen, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng, et al. Review on energy storage application research in the context of flexible distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 86-93.
- [8] 罗剑波, 陈永华, 刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.  
LUO Jianbo, CHEN Yonghua, LIU Qiang. Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 140-146.
- [9] HUI S Y, LEE C K, WU F F. Electric springs: a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552-1561.
- [10] LEE C K, TAN S C, WU F F, et al. Use of Hooke's law for stabilizing future smart grid: the electric spring concept[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA. IEEE, 2013: 5253-5257.
- [11] LEE C K, CHAUDHURI B, HUI S Y. Hardware and control implementation of electric springs for stabilizing future smart grid with intermittent renewable energy sources[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1): 18-27.
- [12] 王青松. 电力弹簧若干关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
WANG Qingsong. Research on key issues of electric springs[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [13] 程明, 王青松, 张建忠. 电力弹簧理论分析与控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2436-2444.  
CHENG Ming, WANG Qingsong, ZHANG Jianzhong. Theoretical analysis and controller design of electric springs[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2436-2444.
- [14] TAN S C, LEE C K, HUI S Y. General steady-state analysis and control principle of electric springs with active and reactive power compensations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 3958-3969.
- [15] YAN S, LEE C K, YANG T B, et al. Extending the operating range of electric spring using back-to-back converter: hardware implementation and control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5171-5179.
- [16] AKHTAR Z, CHAUDHURI B, HUI S Y R. Smart loads for voltage control in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 937-946.
- [17] TAPIA-TINOCO G, GARCIA-PEREZ A, GRANADOS-LIEBERMAN D, et al. Hardware structures, control strategies, and applications of electric springs: a state-of-the-art review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(23): 5349-5363.
- [18] 程益生, 陆振纲, 汪可友, 等. 电力弹簧稳态运行范围及越限失灵机理分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 147-152.  
CHENG Yisheng, LU Zhengang, WANG Keyou, et al. Analysis on steady-state operating range and off-limits malfunction mechanism of electrical spring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 147-152.
- [19] WU J D, WANG K Y, CHENG Y S. Steady-state operation range analysis and off-limits optimization of electric spring[C]//2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering. Oshawa, ON, Canada. IEEE, 2018: 267-272.
- [20] 尹发根, 王淳. 基于无功补偿的电力弹簧有效运行范围分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 9-16.

- YIN Fagen, WANG Chun. Analysis of the effective operating range of electric spring based on reactive power compensation [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 9-16.
- [21] RAUF A M, KHADKIKAR V, ELMOURSI M S. An integrated system configuration for electric springs to enhance the stability in future smart grid[C]//2015 Modern Electric Power Systems (MEPS). Wroclaw, Poland. IEEE, 2015: 1-5.
- [22] 张健, 李天慧, 马刚, 等. 基于智能负载的光伏并网电压和频率稳定方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 52-57.  
ZHANG Jian, LI Tianhui, MA Gang, et al. Voltage and frequency stabilization method for grid-connected photovoltaic system based on smart load[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 52-57.
- [23] 吕广强, 许文敏, 王谱宇. 基于变论域模糊 PI 自适应控制的电力弹簧控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 172-178.  
LYU Guangqiang, XU Wenmin, WANG Puyu. Control strategy for electric spring based on fuzzy proportional-integral self-adaptive control in variable universe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 172-178.
- [24] YUAN C, FENG J Y, TONG M, et al. Piecewise control strategy for electric spring[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(12): 2496-2506.
- [25] YUAN C, FENG J Y, QIU J Q, et al. Seamless mode-switching control for electric spring with capacitor DC bank [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(21): 4824-4834.
- [26] 冯佳耀. 电容型电力弹簧多模态运行机理及控制方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.  
FENG Jiayao. Multi-mode operation mechanism and control method of ES-C[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.

作者简介:



袁敞

袁敞(1981),男,博士,副教授,研究方向为新型功率变换电路和控制方法及其在电力系统中的应用(E-mail:yc\_ncepu@163.com);

邱俊卿(1997),男,硕士在读,研究方向为新型功率变换电路和控制方法及其在电力系统中的应用;

戴笃猛(1997),男,硕士在读,研究方向为新型功率变换电路和控制方法及其在电力系统中的应用。

## Mechanism analysis and control method of electric spring off-limit failure based on two-port impedance model

YUAN Chang, QIU Junqing, DAI Dumeng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** Electric spring (ES) can suppress the voltage fluctuation caused by large-scale grid-connected renewable energy sources. However, ES can only work within a certain range of grid voltage fluctuations. This means, if the grid voltage fluctuates greatly, the ES will expose to the risk of off-limit failure. Focusing on this problem, the steady-state operating range and the failure mechanism of ES are analyzed. Then the influence of changes in critical load target voltage on the operating range of ES is analyzed. After that, a calculation method for critical load target voltage based on a two-port impedance model of ES is proposed, which can expand the operation range of the ES through optimal adjustment of the critical load target voltage effectively. Finally, a simulation model of the three-phase ES is built, and the detailed simulation results verify the validity of the proposed method.

**Keywords:** system voltage fluctuation; electric spring (ES); operating range; off-limit failure analysis; critical load voltage optimization; two-port impedance model

(编辑 方晶)