

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181029

## 基于无功补偿的电力弹簧有效运行范围分析

尹发根<sup>1,2</sup>, 王淳<sup>1</sup>

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 宜春学院理工学院, 江西 宜春 336000)

**摘要:** 为了确保电力弹簧(Electric Spring, ES)工作在有效运行范围内, 实现关键性负载电压稳定及电力供需平衡, 结合相量图法对纯无功补偿的 ES 运行原理进行分析, 获得了 ES 的有效运行范围, 探讨了线路阻抗等参数对该范围的影响。针对现有扩大 ES 有效运行范围的方法需要引入有功补偿的情况, 提出一种自适应调整关键性负载电压目标值的算法, 仅需通过无功补偿就可以扩大 ES 的有效运行范围。详细分析了调整步长对网侧电压有效运行轨迹的影响。最后, 通过在 Simulink 中建立仿真模型验证了分析结果及所提算法的正确性。

**关键词:** 电力弹簧; 稳态运行机理; 有效运行范围; 越限; 自适应调整

### Analysis of the effective operating range of electric spring based on reactive power compensation

YIN Fagen<sup>1,2</sup>, WANG Chun<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Physical Science and Technology Engineering, Yichun University, Yichun 336000, China)

**Abstract:** In order to ensure the Electric Spring (ES) works within the effective operating range to achieve critical load voltage stability and power balance between supply and demand, the operating principle of ES for pure reactive power compensation is analyzed with the vector diagram method, the effective operating range of ES is obtained, and the effects of line impedance and other parameters on the range are discussed. An algorithm for adaptively adjusting the critical load voltage target value is proposed since expanding the effective operation range need to introduce active power compensation in existing methods. This algorithm can expand the effective operation range of ES only by reactive power compensation. The effect of the adjustment step length on the effective operation locus of line voltage is analyzed in detail. Finally, the simulation model in Simulink is established to validate the analysis results and the proposed algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467012).

**Key words:** electric spring; steady-state operating mechanism; effective operating range; off-limit; adaptive adjustment

## 0 引言

随着各国对环境问题日益重视, 许多国家不断减少化石能源发电, 逐步提高可再生能源(Renewable Energy Source, RES)发电比例<sup>[1-3]</sup>。但是在传统的用户需求量决定发电量的电网运行模式下, 含高比例 RES 发电的系统容易出现电力供需不平衡现象, 这会引起谐波污染、电压波动、频率闪变等各种问题<sup>[4]</sup>。为解决这些问题, 研究人员提出了一种用电需求跟随发电量的电网运行新模式, 即需求侧管理模式<sup>[5-6]</sup>。现有的需求侧管理模式主要方法有: (1) 电力需求任

务调度法<sup>[7-8]</sup>; (2) 实时定价法<sup>[9-10]</sup>; (3) 利用储能缓解高峰需求法<sup>[11]</sup>; (4) 直接负载控制或智能负载开断控制法<sup>[12-13]</sup>。方法(1)和方法(2)能够在发电量可预测的情况下降低高峰时的负荷需求, 但是无法实现电力供需实时平衡。方法(3)利用储能系统响应速度快的特点<sup>[14]</sup>能够实现电力供需瞬时平衡, 但是受容量和成本的制约, 作用有限。方法(4)通过调节用户需求缓解电力供需不平衡, 但计划外电器控制会影响用户的用电舒适度。

香港大学 Shu Yuen (Ron) Hui 团队于 2012 年在文献[15]中将机械弹簧的性质对偶到电力系统中, 提出了电力弹簧(Electric Spring, ES)概念, 形成了一种需求侧管理模式新方法。ES 能在网侧电压不稳定时, 将波动的电压/能量转移到与其串联的非关键性

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51467012); 国家国际科技合作专项(2014DFG72240)

负载( $Z_{NCL}$ )上实现电力供需平衡,并使关键性负载( $Z_{CL}$ )电压稳定。最初伴随电力弹簧概念提出的ES拓扑仅能补偿无功,其实质是一个无功发生器<sup>[15-16]</sup>,但与传统无功补偿装置有很大区别<sup>[17]</sup>。静止同步串联补偿器、静态无功发生器以及静止无功补偿器均是单一设备,采用集中方式对系统进行无功补偿。而ES与其他电器组成智能负载分布式镶嵌在系统中,既可以单独运行也可以成组分布式协同运行。文献[18]利用下垂控制获得了系统中ES不同安装节点的参考电压,并将它们作为一组关键性负载的电压目标值,提出了ES协同运行控制策略。ES通过改变直流侧元件可以实现有功补偿,文献[19]介绍了ES有功和无功补偿的控制原理,并进行了稳态分析。文献[20]利用ES的有功补偿对孤岛微网的频率进行调节,仿真和实验结果表明ES有助于系统频率稳定。

与机械弹簧类似,ES稳定运行也有一定的范围限制,本文将网侧电压超出ES有效运行范围的情况称为网侧电压越限。针对网侧电压越限,文献[21]将直流侧元件改为储能元件,扩大了ES的有效运行范围;文献[22]则提出了一种串联、并联ES背靠背的结构,利用这种结构的内部功率流不用在控制回路中考虑的特点扩大了有效运行范围。这两种方法虽然有效,但均引入了有功补偿,因此增加了控制难度。文献[23]在ES纯无功补偿的基础上,通过优化关键性负载电压目标值,扩大了ES的有效运行范围,但没有分析网络参数对有效运行范围的影响,也没有探讨电压目标值调整步长对网侧电压运行轨迹的影响。

本文以RES发电并网的电力系统为研究对象,利用相量图法对纯无功补偿的ES稳态运行机理和有效运行范围进行分析,探讨各参数对该范围的具体影响。针对电压允许小幅波动的关键性负载,提出一种自适应调整电压目标值的算法,并分析了电压调整步长对网侧电压有效运行轨迹的影响。当网侧电压越限时,所提算法能使关键性负载电压稳定在调整后的目标值上,扩大ES的有效运行范围。最后,利用Mtalab/Simulink软件对文中所提算法和分析结果进行了仿真验证。

## 1 电力弹簧稳态运行机理分析

### 1.1 电力弹簧模型及其控制

图1中红色虚线框内为ES, $Z_1$ 为输电线路阻抗,ES与非关键性负载 $Z_3$ 串联组成智能负载(SL),SL与关键性负载 $Z_2$ 并联后接入电网。实际应用中 $Z_2$ 代表对电压敏感的电器, $Z_3$ 为输入电压有一定宽

度的电器(如电炉、烤箱等)。 $\dot{U}_G$ 为RES发电并网的网侧输出电压, $\dot{U}_{Sref}$ 、 $U_s$ 分别为关键性负载目标电压及实际电压有效值,其他参数如图1所示。

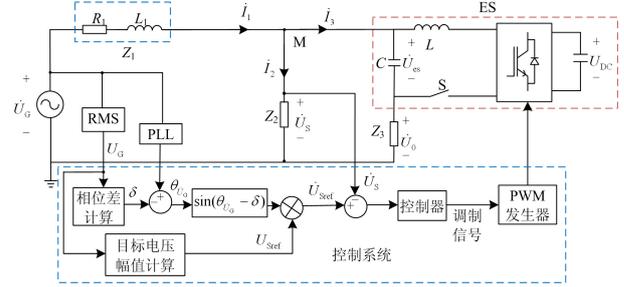


图1 电力弹簧结构及控制框图

Fig. 1 ES topology and control block diagram

运行时控制系统对 $\dot{U}_G$ 取有效值和相位,并通过相位差、目标电压幅值计算模块获得 $\dot{U}_{Sref}$ 。 $U_s$ 与 $\dot{U}_{Sref}$ 的误差通过控制器后产生调制信号,该信号经PWM发生器控制开关管通断调节ES输出电压,使关键性负载电压稳定在目标值上。开关S控制ES接入系统,当 $\dot{U}_G$ 超过ES最大调节范围时,为避免带来额外问题S将断开。

### 1.2 纯无功补偿的电力弹簧工作模式

ES在纯无功补偿时有阻性、感性、容性三种工作模式。阻性模式下 $\dot{U}_{es}$ 为0,此时的 $\dot{U}_s$ 为目标电压 $\dot{U}_{Sref}$ ,相应有效值 $U_G$ 为网侧电压参考有效值 $U_{Gref}$ ,阻性模式为感性和容性模式的过渡。当 $U_G > U_{Gref}$ 时,ES工作在感性模式,ES等效于电感, $\dot{U}_{es}$ 超前 $\dot{I}_3 90^\circ$ ;当 $U_G < U_{Gref}$ 时,ES工作在容性模式, $\dot{U}_{es}$ 落后 $\dot{I}_3 90^\circ$ 。将 $Z_2$ 取为纯电阻,根据图1有

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \\ Z_2 = R_2 \\ Z_3 = R_3 + j\omega L_3 \end{cases} \quad (1)$$

选取 $\dot{I}_3$ 为参考量,可得

$$\begin{cases} \dot{I}_3 = I_3 \angle 0^\circ \\ \dot{U}_s = U_s \angle \theta \end{cases} \quad (2)$$

$$\dot{U}_G = \dot{U}_s + \dot{I}_1(R_1 + j\omega L_1) = \dot{V}_a + \dot{V}_b \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \frac{R_1 + R_2 + j\omega L_1}{R_2} \dot{U}_s = |\dot{V}_a| \angle (\varphi_0 + \theta) \\ \dot{V}_b = \dot{I}_3 Z_1 = I_3 |Z_1| \angle \varphi_1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} |\dot{V}_a| = U_s \times \frac{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L_1)^2}}{\omega L_1} \\ |\dot{V}_b| = I_3 |Z_1| \end{cases} \quad (5)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L_1}{R_1 + R_2}\right) \quad (6)$$

$$\dot{U}_s = \dot{U}_0 + \dot{U}_{es} \quad (7)$$

根据式(1)一式(7)可以画出 ES 稳态时的相量关系图。为方便对比, 本文将三种工作模式相量图画在一起, 如图 2 所示, 选取感性模式进行阐述。

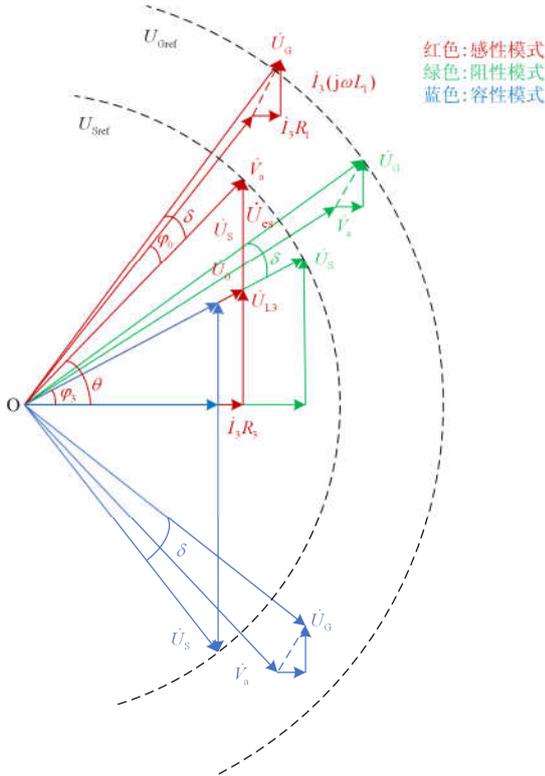


图 2 ES 三种不同工作模式下的相量关系图

Fig. 2 Vector diagram under three different modes of ES

由图 2 可知,  $\dot{U}_{es}$  与  $\dot{U}_{L3}$  构成了  $\dot{U}_s$  的垂直分量, 即有

$$U_{es} = U_s \times \sin \theta - U_{L3} \quad (8)$$

$$I_3 = \frac{U_s \times \cos \theta}{R_3} \quad (9)$$

$\dot{V}_a$  超前  $\dot{U}_s$   $\varphi_0$  角, 与  $\dot{I}_3$  在  $Z_1$  上产生的电压  $\dot{V}_b$  合成  $\dot{U}_G$ 。容性模式的分析过程与感性模式一致, 只是由于  $\dot{U}_{es}$  落后  $\dot{I}_3$   $90^\circ$ , 有

$$U_{es} = U_s \times \sin \theta + U_{L3} \quad (10)$$

阻性模式下  $\dot{U}_{es}$  为 0, 阻性和容性模式下只标示了部分重要相量。由图 2 可知, 三种模式下  $U_s$  都可以稳定在  $U_{sref}$ , 相应的  $U_G$  分别等于、大于、小于  $U_{Gref}$ 。

令  $P_s$  为电网对 M 点的输入有功功率, 有

$$P_s = P_{Z_2} + P_{SL} \quad (11)$$

由于 ES 仅与电网交流无功功率, 所以

$$P_s = P_{Z_2} + P_{Z_3} \quad (12)$$

$$P_{Z_2} = \left( \frac{\dot{U}_s}{Z_2} \right)^2 \operatorname{Re}(Z_2) \quad (13)$$

$$P_{Z_3} = \left( \frac{\dot{U}_0}{Z_3} \right)^2 \operatorname{Re}(Z_3) \quad (14)$$

当 ES 稳定运行时, 由于  $U_s$  不变  $P_{Z_2}$  恒定。ES 通过调节  $\dot{U}_{es}$  使  $\dot{U}_0$  发生改变, 进而使  $P_{Z_3}$  跟随  $P_s$  的变化, 达到转移波动功率、平衡电力供需的目的。

## 2 $U_{sref}$ 恒定时 ES 有效运行范围分析

### 2.1 ES 有效运行范围及网侧电压有效运行轨迹

由图 1 及式(2)一式(6)、式(9)可知, 当网络参数不变且  $U_s$  稳定在  $U_{sref}$  时,  $|\dot{V}_a|$  和  $\varphi_{V_a}$  不变,  $\varphi_{V_a}$  及  $|\dot{V}_b|$  随  $\theta$  的变化而改变, 且每一个  $\theta$  值对应唯一的  $\dot{U}_G$ 。由于  $Z_3$  为阻抗负载, 所以  $\theta$  的取值为  $(-\pi/2, +\pi/2)$ 。由此可以得到 ES 稳态运行时的有效运行范围及  $\dot{U}_G$  的运行轨迹, 如图 3 所示。

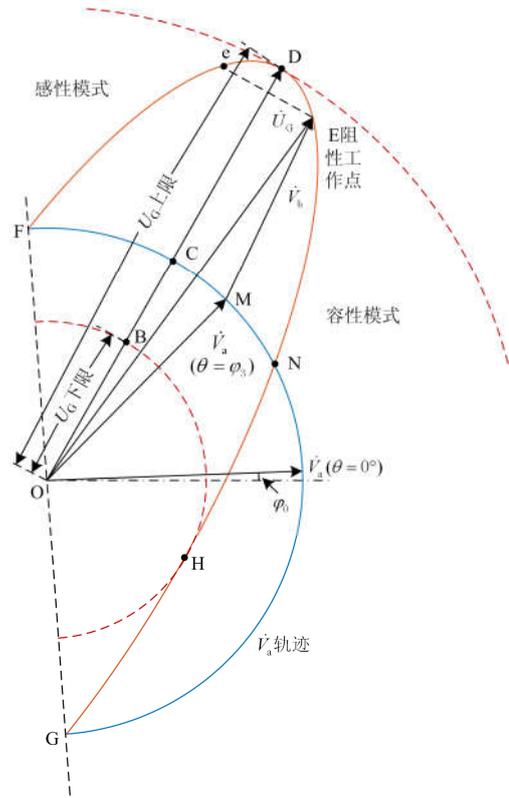


图 3 网侧电压轨迹及 ES 有效运行范围

Fig. 3 Locus of line voltage and the effective range of ES

图 3 中,  $\dot{V}_a$  轨迹为以 O 点为圆心, 半径等于  $|\dot{V}_a|$  的蓝色半圆, 该半圆与垂直线存在夹角  $\varphi_0$ 。每一个  $\theta$  值对应的  $\dot{V}_a$ 、 $\dot{V}_b$  合成相应的  $\dot{U}_G$ , 其轨迹为黄褐色曲线。以 O 点为圆心, 分别以  $OB$ 、 $OD$  为半径做圆, 与  $\dot{U}_G$  轨迹内切、外切于 H、D 点。当  $U_G < |OB|$  或  $U_G > |OD|$  时, 以  $U_G$  为半径的圆与  $\dot{U}_G$  轨迹无交点, 说明  $U_G$  超出了 ES 的有效运行范围,  $\dot{U}_s$  无法稳定在目标值上; 当  $U_G = |OB|$  或  $U_G = |OD|$  时有一个交点, 表明  $U_G$  处于 ES 有效运行范围临界点上,  $\dot{U}_s$  能稳定在目标值; 当  $|OD| > U_G > |OB|$  时有两个交点, 电力弹簧可以在两个  $\theta$  值下使  $\dot{U}_s$  稳定在目标值。由此可知, 将  $\dot{U}_s$  稳定在目标值的 ES 有效运行范围为  $|OD| \geq U_G \geq |OB|$ 。由于第三种情况下, 同一  $U_G$  对应两个  $\theta$  值, 因此有必要进行优化选取。由图 2 可知,  $|\theta|$  越大  $U_{es}$  越大且  $U_0$  越小, 从安全运行的角度考虑, ES 输出电压应取更小值, 同时非关键性负载作为电器设备, 使其正常工作的电压值也应有下限。因此, 选取  $\theta$  值更小的点作为稳定控制点。

图 3 中 E 点对应  $\theta = \varphi_3$ , 此时  $\dot{U}_{es} = 0$  为阻性工作点。E 点将  $\dot{U}_G$  运行轨迹分为曲线 FDE 和 ENG 两部分, 分别对应感性工作模式和容性工作模式。 $\dot{U}_G$  运行轨迹根据其有效值大小分为三部分, 即曲线 eDE、曲线 Fe+EN 和曲线 NHG。根据  $\theta$  优选原则, 应选取曲线 DE、EN、NH 组成  $\dot{U}_G$  的有效运行轨迹。

### 2.2 网络参数对有效运行范围的影响

由式(2)一式(6)、式(9)可知,  $U_{Sref}$  恒定时, ES 稳态运行的有效运行范围受  $Z_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的影响。下面通过 Matlab 软件分析各参数对 ES 有效运行范围的具体影响, 每次仿真只改变一个参数(参数初始值见表 1)。定义  $K_X = R_2 / R_3$ ,  $X$  代表公式中的变化量。

由图 4(a)可知, ES 有效运行范围的上、下限值随着  $K_{R_3}$  变大而分别增大和减小, 有效运行范围变大。图 4(b)中 ES 有效运行范围上、下限值在  $K_{R_2}$  大于 10 时基本没变化, 当  $K_{R_2}$  小于 10 时均变大且变化幅度与  $K_{R_2}$  负相关, 但是  $K_{R_2}$  值的变化基本不影响有效运行范围的宽度。图 4(c)表明, ES 有效运行范围上、下限值随电感  $L_1$  增大分别变大和减小, 因此有效运行范围随  $L_1$  增大而扩大。图 4(d)表明, ES 有效运行范围的上、下限值均随  $R_1$  的增大而变大, 而且上限值增幅大于下限值, 所以有效运行范围随  $R_1$  增大而扩大。综合图 4(a)、4(b)可知, 当电力弹

簧安装位置确定后, 用户可以通过减小  $R_3$  使  $K_X$  增大, 进而获得更大的有效运行范围。

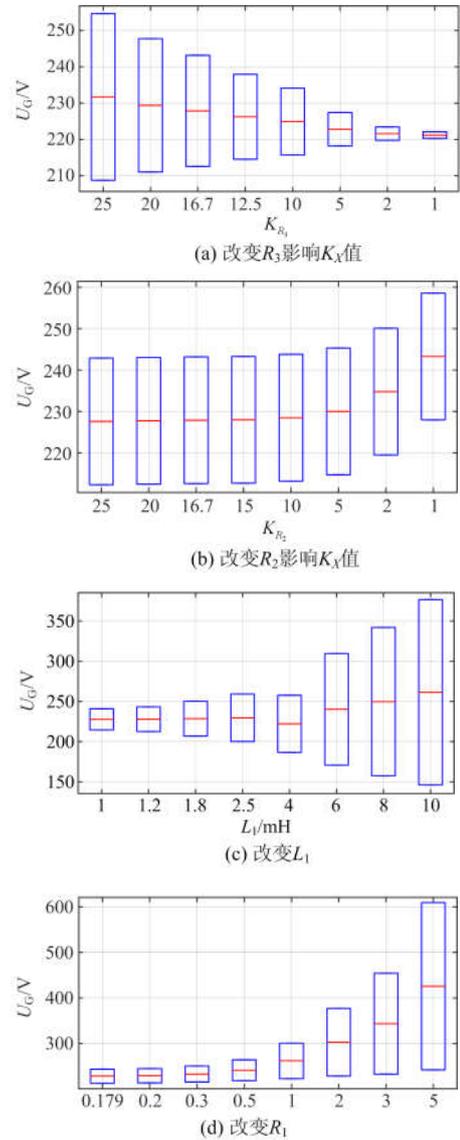


图 4 参数对有效运行范围的影响

Fig. 4 Effects of parameters on the effective operating range

## 3 $U_{Sref}$ 允许波动时 ES 有效运行范围分析

2.2 节表明, 当网络参数和  $U_{Sref}$  恒定时 ES 的有效运行范围是确定的。本节针对  $U_{Sref}$  允许小幅波动的关键性负载, 提出一种自适应调节  $U_{Sref}$  的算法, 扩大 ES 的有效运行范围。

### 3.1 $U_{Sref}$ 允许波动时 ES 有效运行范围

假设  $U_{Sref}$  基准值为  $V_S$ , 允许波动范围为  $W$ , 则  $U_{Sref1} = V_S - W$ 、 $U_{Sref2} = V_S + W$  分别为  $U_{Sref}$  的最小值和最大值。基于图 3 绘制了  $U_{Sref}$  分别为  $U_{Sref1}$ 、 $V_S$ 、 $U_{Sref2}$  对应的  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹, 如图 5 所示。图 5

中以  $\theta = 0^\circ$  为例绘制了以上三种  $U_{Sref}$  对应的  $\dot{U}_G$ , 由图可知, 同一  $\theta$  值下不同  $U_{Sref}$  对应的  $\dot{U}_G$  在同一条以 O 点为起点的射线上。而且式(2)~式(6)、式(9)表明,  $U_{Sref}$  变化并不会影响  $\dot{U}_G$  上、下限对应的  $\theta$  值。所以  $U_{Sref1}$ 、 $U_{Sref2}$  对应有效运行范围的上、下限依然在射线 OD 和 OC 上。分别以线段  $OC_1$ 、 $OC$ 、 $OC_2$  为半径做圆相交于射线 OD, 可以获得以上三种  $U_{Sref}$  值对应的 ES 有效运行范围, 分别为  $|OB_1| \leq U_G \leq |OD_1|$ 、 $|OB| \leq U_G \leq |OD|$ 、 $|OB_2| \leq U_G \leq |OD_2|$ 。由图 5 可知, 当  $U_{Sref}$  变小时, ES 有效运行范围也会变小, 运行上、下边界会向 O 点移动。当  $U_{Sref}$  变大时相反, 运行上、下边界会向外移动。

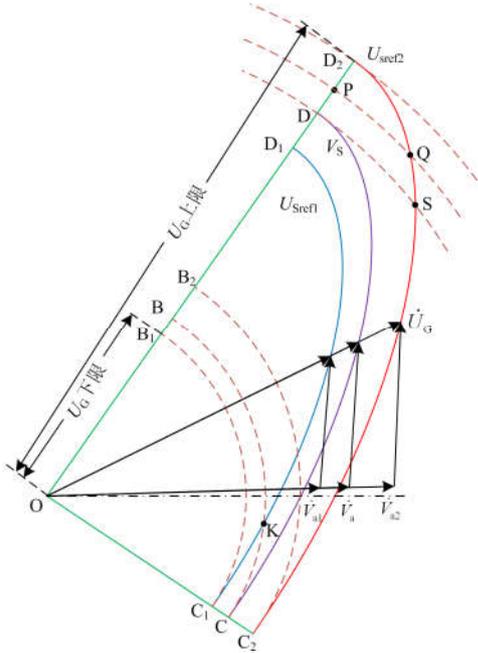


图 5  $U_{Sref}$  波动下的 ES 有效运行范围

Fig. 5 Effective range of ES under  $U_{Sref}$  fluctuations

当  $|OD_2| \geq U_G > |OD|$  时, 相对  $V_S$  网侧电压发生了上限越限, 令越限发生在 P 点。由于以 O 点为圆心, 半径为  $|OP|$  的圆与曲线 DC 无交点, 但与曲线  $D_2C_2$  有交点 Q, 因此  $U_S$  无法稳定在  $V_S$  上, 却能稳定在  $U_{Sref2}$  上。同理可知, 当越限发生在  $|OB_1| \leq U_G < |OB|$  时  $U_S$  能稳定在  $U_{Sref1}$  上。所以当  $\dot{U}_G$  越限时, ES 可以在允许波动范围内, 通过调整  $U_{Sref}$  使  $U_S$  稳定在新的目标值上。通过调整  $U_{Sref}$ , 图 5 中 ES 有效运行范围由  $|OB| \leq U_G \leq |OD|$  扩大到了  $|OB_1| \leq U_G \leq |OD_2|$ 。

### 3.2 自适应调整 $U_{Sref}$ 算法

自适应调整  $U_{Sref}$  算法如图 6 所示, 当  $\dot{U}_G$  越限时  $U_{Sref} \pm T$ ,  $T$  为调整步长, 其值应根据实际情况设置, 上限越限时取+号, 反之取-号。  $U_{Sref} \pm T$  在允许波动范围内, 用此值更新  $U_{Sref}$ 。依据更新后的  $U_{Sref}$  判断  $\dot{U}_G$  是否越限, 如未越限, ES 将稳定关键性负载电压于此值, 如果依然越限,  $U_{Sref}$  将继续调整, 直至  $\dot{U}_G$  不越限。但是如果  $U_{Sref}$  调整到波动边界时  $\dot{U}_G$  依然越限, ES 将退出工作。

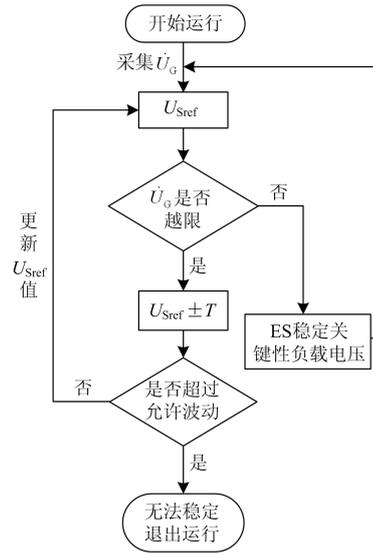


图 6 自适应调整  $U_{Sref}$  算法

Fig. 6 Adaptive adjustment  $U_{Sref}$  algorithm

### 3.3 调整步长对网侧电压有效运行轨迹的影响

$T$  的取值对  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹有显著影响。图 5 中, 若取  $T = W/n$  ( $n$  为大于或等于 1 的正整数), 则在曲线 DC 两侧各有  $n$  条  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹, 它们分别与  $U_{Sref} = V_S \pm KT$  ( $K = 1, 2, \dots, n$ ) 相对应。  $|OD| < |\dot{U}_G| \leq |OD_2|$  和  $|OB_1| \leq |\dot{U}_G| < |OB|$  对应的  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹被分为  $n$  部分, 分属于该  $2n$  条  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹中。因此  $|OB_1| \leq |\dot{U}_G| < |OD_2|$  的整条  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹为曲线 DC 加上该  $2n$  条  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹的相应部分。

$n = 1$  时,  $T = W$ , P 点越限对应的关键性负载新电压目标值为  $U_{Sref2}$ , 所以稳定在 Q 点上, 也就是说当  $|OD| < |\dot{U}_G| \leq |OD_2|$  时, 对应  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹为曲线  $D_2S$ 。同理可知  $|OB_1| \leq |\dot{U}_G| < |OB|$  时, 对应  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹为曲线  $C_1K$ 。综上所述,  $\dot{U}_G$  总的

有效运行轨迹为曲线  $D_2S + DC + C_1K$ 。

当  $n$  为大于 1 的不同值时, P 点越限对应的稳定点将形成曲线 PQ, 且  $n$  越大稳定点越接近 P 点。当  $n \rightarrow +\infty$ , 即  $T \rightarrow 0$  时, 稳定点与 P 点几乎重合, 此时稳定点所在的  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹对应的  $U_{Sref}$  与  $V_S$  最接近。当越限发生在  $|OB_1| \leq U_G < |OB|$  时, 可以得出相同的结论。因此, 如果以  $\min|U_{Sref} - V_S|$  为优化目标, 则  $\dot{U}_G$  有效运行轨迹为曲线 DC+线段  $D_2D$ +线段  $C_1C$ , 相应  $U_{Sref}$  可由式(15)得到<sup>[23]</sup>。

$$U_{Sref} = \begin{cases} \frac{U_G}{|OD|} \times V_S & \text{发生上限越限} \\ V_S & \text{未发生越限} \\ \frac{U_G}{|OB|} \times V_S & \text{发生下限越限} \end{cases} \quad (15)$$

相对所提算法, 由式(15)确定  $U_{Sref}$  更简单。但是以  $\min|U_{Sref} - V_S|$  为优化目标时  $T \rightarrow 0$ , 这对控制器的精度提出了很高的要求。另一方面, 由式(15)确定的  $U_{Sref}$  所对应的稳定点都处于 ES 有效运行范围的临界点上, 实际应用中很难保证所有参数都处于理想状态, 因此很容易导致系统不稳定。相对而言, 本文中所提算法虽然运算量更大, 但是稳定性更好, 而且步长可调, 更有利于实际应用。

#### 4 仿真验证

本文利用 Matlab/Simulink 软件搭建了如图 1 所示的仿真模型, 对文中分析结果及所提算法进行验证。为简化仿真过程, 负载均采用纯电阻, 具体网络参数如表 1 所示。

表 1 ES 系统仿真参数值

Table 1 Parameters of the ES circuit

参数	数值
关键性负载电压基准目标值 $V_S/V$	220
$U_{Sref}$ 允许波动范围 $W/V$	3
输电线路电阻值 $R_l/\Omega$	0.179
输电线路电感值 $L_l/mH$	1.2
关键性负载电阻值 $R_2/\Omega$	50
非关键性负载电阻值 $R_3/\Omega$	3
低通滤波器电感值 $L/mH$	3
低通滤波器电容值 $C/\mu F$	50
$U_S$ 自适应调整步长 $T/V$	0.2
ES 直流侧电压 $U_{DC}/V$	350
开关频率 $f_s/kHz$	20

由表 1 中的参数计算出  $U_{Sref}=220V$  时,  $U_{Gref}$  为  $235.7V$ , ES 的有效运行范围为  $212.6(-9.8\%) \sim 243.1V(+3.29\%)$ 。在验证电力弹簧的电压稳定性能

以及有功功率转移作用时, 选取  $214.5V$ 、 $235.7V$  和  $242.8V$  三个电压, 分别对应 ES 的容性、阻性、感性三种工作模式, 每个等级运行时间为  $0.1s$ 。验证所提方法的有效性时, 选取了 7 个网侧电压分别为 [1]212.2V、[2]219.2V、[3]227.2V、[4]235.7V、[5]240.5V、[6]243.1V 和 [7]245.2V。其中 [1] 为下限越限, [7] 为上限越限, 每个电压等级运行时间为  $0.08s$ 。

由图 7、图 8 可以看出, 无 ES 作用时,  $U_S$  值随  $\dot{U}_G$  变化而发生改变,  $P_{Z_2}$ 、 $P_{Z_3}$  均跟随  $P_S$  的变化。有 ES 作用时, 三种工作模式下  $U_S$  都能稳定在  $220V$ , 仅在  $\dot{U}_G$  突变时出现短暂的过渡过程,  $1.5$  到  $2$  个工频周期后即能稳定; 同时  $P_{Z_2}$  保持不变,  $P_{Z_3}$  则一直跟随  $P_S$  变化, 说明 ES 将  $Z_2$  上的有功功率波动转移给了  $Z_3$ , 符合理论分析。

由图 9 可以看出, 三种工作模式下,  $\dot{U}_S$  幅值始终保持不变,  $\dot{U}_{es}$  随  $\dot{U}_G$  变化而改变, 容性模式下  $\dot{U}_{es}$  滞后  $i_{es} 90^\circ$ , 阻性模式时,  $\dot{U}_{es}$  经过大约  $1.5$  个工频周期后稳定在  $0V$ , 感性模式下  $\dot{U}_{es}$  超前  $i_{es} 90^\circ$ 。

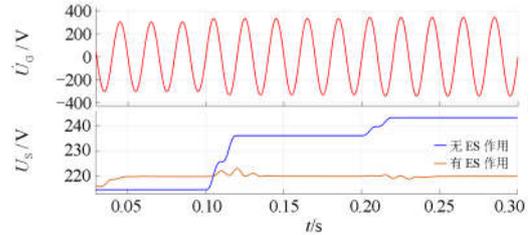
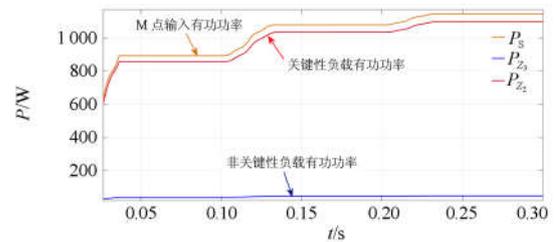
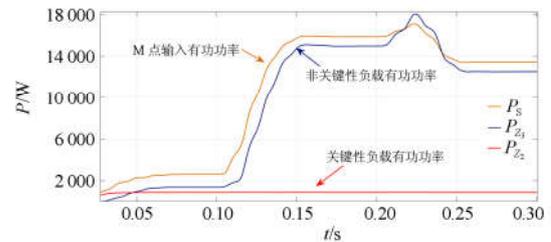


图 7 ES 对关键性负载电压的稳定作用

Fig. 7 Effect of ES on the stability of critical load voltage



(a) 无 ES 作用时有功功率曲线



(b) 有 ES 作用时有功功率曲线

图 8 电力弹簧对负载有功功率的作用

Fig. 8 Effect of ES on the active power of the load

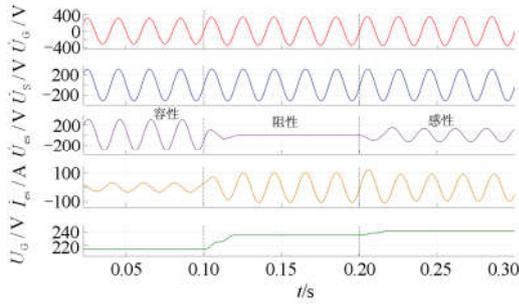


图 9 不同工作模式下的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms under different modes

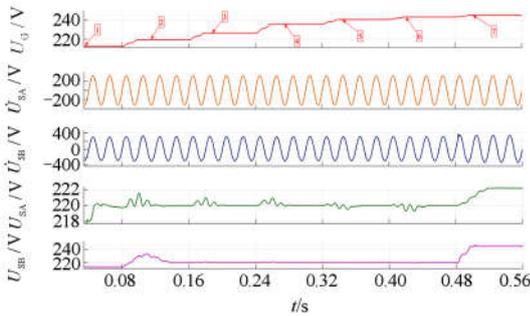


图 10 含越限情况的仿真结果

Fig. 10 Simulation results including over-limit conditions

图 10 中,  $\dot{U}_{SA}$ 、 $\dot{U}_{SB}$ 、 $U_{SA}$ 、 $U_{SB}$  分别为自适应调整  $U_{Sref}$  和  $U_{Sref}$  恒定时的  $\dot{U}_S$  波形及其有效值。从图 10 中可以看出: 由于网侧电压 [2]、[3]、[4]、[5]、[6] 都在  $U_{Sref} = 220$  V 所对应的有效运行范围内, 因此在 0.08 s~0.48 s 期间, 两种情况下  $\dot{U}_S$  都能经过短暂的调整后稳定在 220 V; 但当网络运行在 [1] 和 [7] 时,  $U_{Sref}$  恒定时  $\dot{U}_S$  分别为 213.0 V 和 245.7 V, 与 220 V 相差很大; 而自适应调整  $U_{Sref}$  情况下,  $\dot{U}_S$  则分别稳定在 219.8 V 和 222.2 V。以上结果说明, 当  $\dot{U}_G$  越限时, 自适应调整  $U_{Sref}$  算法能够扩大 ES 的有效运行范围, 相应的  $\dot{U}_S$  调整值也在允许波动范围内, 系统能够继续稳定运行。

## 5 结论

本文在分析电力弹簧稳态运行机理的基础上, 结合相量图获得了纯无功补偿 ES 的有效运行范围, 探讨了相关参数对该范围的影响。针对参考电压允许小幅波动的关键性负载, 提出了自适应调整电压目标值算法, 详细分析了不同调整步长对网侧电压有效运行轨迹的影响。主要结论如下。

1) 在有效运行范围内, 三种工作模式下 ES 均

能稳定关键性负载电压, 并通过将功率波动转移给非关键性负载确保电力供需平衡。

2) 关键性负载电压参考值恒定情况下, 电力弹簧的有效运行范围受系统各参数的影响, 用户可以通过减小非关键性负载阻值扩大有效运行范围。

3) 对于目标电压允许小幅波动的关键性负载, 采用自适应调整电压目标值算法, 无需引入有功补偿, 也不用改变系统参数就可以扩大 ES 的有效运行范围, 目标值调整步长不但影响网侧电压有效运行轨迹而且决定控制系统的精度要求。

## 参考文献

- [1] China eyes 20% renewable energy by 2020[N]. China Daily, 2009-06-10.
- [2] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.  
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [3] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.  
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [4] CHENG Ming, ZHU Ying. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2014(88): 332-347.
- [5] VARAIYA P P, WU F F, BIALEK J W. Smart operation of smart grid: risk-limiting dispatch[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 40-57.
- [6] PALENSKY P, DIETRICH D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 381-388.
- [7] MOHSENIAN-RAD A, WONG V W S, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.
- [8] PARVANIA M, FOTUHI-FIRUZABAD M. Demand response scheduling by stochastic SCUC[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 89-98.
- [9] CONEJO A J, MORALES J M, BARINGO L. Real-time

- demand response model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 236-242.
- [10] MOHSENIAN-RAD A, LEON-GARCIA A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.
- [11] KIENZLE F, AHˆCIN P, ANDERSSON G. Valuing investments in multienergy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 194-202.
- [12] HEFFNER G C, GOLDMAN C A, MOEZZI M M. Innovative approaches to verifying demand response of water heater load control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 388-397.
- [13] BROOKS A, LU E, REICHER D, et al. Demand dispatch[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(3): 20-29.
- [14] 叶鹏, 李山, 何淼, 等. 风储孤网系统运行与控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 163-170.  
YE Peng, LI Shan, HE Miao, et al. Review of operation and control of the wind storage isolated network system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 163-170.
- [15] HUI S Y R, LEE C K, WU F F. Electric springs-a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552-1561.
- [16] HUI S Y R, LEE C K, WU F F. Power control circuit and method for stabilizing a power supply: US, US 20120080420 A1[P]. 2012.
- [17] 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.
- [18] LEE C K, CHAUHURI N R, CHAUHURI B, et al. Drooping control of distributed electric spring for stabilizing future power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1558-1566.
- [19] TAN S C, LEE C K, HUI S Y R. 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.
- [20] YAN S, LUO X, TAN S C, et al. Electric springs for improving transient stability of micro-grids in islanding operations[C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 20-24, 2015, Montreal, QC, Canada, 2015: 5843-5850.
- [21] WANG Qingsong, CHENG Ming, CHEN Zhe, et al. Steady-state analysis of electric springs with a novel  $\delta$  control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7159-7169.
- [22] 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.
- [23] 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.

收稿日期: 2018-08-12; 修回日期: 2018-09-09

作者简介:

尹发根(1982—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为绿色能源转换及电力系统优化与控制; E-mail: ynx522@163.com

王 淳(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用等。E-mail: cu\_wang@126.com

(编辑 许威)