# 电力弹簧稳态运行范围及越限失灵机理分析

程益生1,陆振纲2,汪可友1,赵国亮2,黄 鑫1,柳劲松3

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学),上海市 200240;

2. 先进输电技术国家重点实验室(全球能源互联网研究院),北京市 102211;

3. 国网上海市电力公司科学研究院,上海市 200437)

摘要: 在介绍电力弹簧的研究背景和基本原理的基础上,通过相量图法对电力弹簧稳态调节能力 进行详细分析,得到电力弹簧稳态运行范围,同时分析电力弹簧越限失灵的机理,给出了网侧电压 越限条件下的关键负载电压设定值优化计算方法。若网侧电压在稳态运行范围内波动,经电力弹 簧调节,可使关键负载电压幅值稳定到标准值;若超出稳态运行范围,即发生越限,则受电力弹簧调 节能力限制,关键负载电压稳定值会发生偏离,甚至会发生电力弹簧失灵情况。通过优化网侧电压 越限情况下的关键负载电压设定值计算方法,考虑关键负载电压允许小范围波动,可以保证电力弹 簧在网侧电压越限情况下依旧正常工作,从而扩大电力弹簧稳定运行范围。最后,通过仿真实验对 分析结果进行了验证。

关键词: 电力弹簧; 稳态运行范围; 越限失灵; 相量分析

#### 0 引言

随着可再生能源发电如风电、光伏等的大量并 网,可再生能源发电的间歇性、不稳定性、预测精度 不高等特点,造成的发电量与负荷需求的不平衡问 题日益突出,影响电力系统的运行安全与供电电能 质量。

针对上述现状,香港大学提出了"电力弹簧"的 构想,将机械弹簧的概念引入电力系统中<sup>[1-2]</sup>。电力 弹簧由一个输入电压控制与一个功率控制器构成, 通过电力弹簧将电网中电压(能量)波动转移到非关 键负载,稳定关键负载电压,并自动调节非关键负载 耗电量,实现发电量与用电量的自动平衡。电力弹 簧改变了传统电力系统发电量跟随负载变化的运行 方式,实现了需求侧负载跟随发电量变化的新型运 行方式,可以有效克服可再生能源发电并网造成的 发电量与负荷不匹配问题<sup>[3]</sup>。研究表明,电力弹簧 运用于新型微电网中,还可以降低系统对储能容量 的需求,节约成本;可以减小系统三相不平衡;可以 改善电力系统的供电电能质量<sup>[4-5]</sup>。

与其他现有的提高微电网电能质量方法相比,

上网日期: 2017-05-10。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900504);国家电网 公司科技项目"基于电力弹簧的微电网新型运算模式原理、 设计与控制技术研究"。 电力弹簧与非关键负载串联,构成的智能负载具有 较强的负荷响应能力,能将分布式能源波动转移到 非关键负载,也能参与频率调节<sup>[6]</sup>。而其他微电网 电压调整方法则一般直接与关键负载串联,如静止 同步串联补偿器(SSSC)、动态电压调节器(DVR), 或直接与关键负载并联,如静止同步补偿装置 (STATCOM),在某些情况下,电力弹簧的调整效 率比普通无功补偿装置更高<sup>[7]</sup>。

然而,和机械弹簧一样,电力弹簧也运行在一个 受限的范围内,其运行范围受直流侧电压、关键负载 与非关键负载工作电压范围、网络元件参数等因素 的限制。文献[8]中分析了电力弹簧额定功率对运 行范围的影响,并通过背靠背逆变器方式组合并联 型与串联型电力弹簧提高其稳态运行范围,其运行 范围是指功率调节的范围。本文研究电力弹簧稳态 运行对应的网侧电压波动范围问题。

本文结合向量图对含电力弹簧的电力系统稳态 运行情况进行分析,研究了电力弹簧稳态运行时的 网侧电压范围,分析发现电力弹簧可以调节的网侧 电压是有限的,当网侧电压波动过大时,电力弹簧将 无法完成控制目标;分析了电力弹簧越限失灵的机 理,并给出了网侧电压越限情况下电力弹簧关键负 载电压设定值优化计算方法,以及含网侧电压越限 工况的电力弹簧稳定运行范围。最后,通过纯软件 仿真实验和硬件在环仿真实验分别对分析结果进行

收稿日期:2016-12-07;修回日期:2017-03-05。

了验证。

#### 1 电力弹簧的原理

如图 1 所示为电力弹簧拓扑与控制框图。右侧 虚线框内由电压源型逆变器和 LC 滤波器组成的电 路为电力弹簧,电力弹簧和非关键负载串联共同构 成一个智能负载,然后与关键负载并联接入电网运 行。下部虚线框内为电力弹簧控制框图。图中,U<sub>es</sub> 为电力弹簧端电压,I<sub>1</sub>为网侧输电线路电流,I<sub>2</sub>和 Ù<sub>s</sub>分别为关键负载电流和电压,I<sub>3</sub>和Ù<sub>0</sub>分别为非关 键负载电流和电压, $\dot{V}_s$ 为关键负载电压测量值,L和C分别为滤波电感和电容, $U_i$ 为逆变器交流侧的输出电压, $U_{dc}$ 为逆变器直流侧电压, $\dot{U}_G$ 和 $\dot{V}_G$ 分别为电网侧电压及其有效值, $R_1$ 和 $L_1$ 分别为输电线路的电阻和电抗, $Z_2$ 为关键负载, $Z_3$ 为非关键负载。 一般将电压敏感性负载视为关键负载,通过电力弹簧稳定关键负载电压,保证其供电电压质量,而将电压敏感性较低的负载视为非关键负载,如加热或冷却装置(电水壶、冰箱等),在控制过程中,将电网电压(或能量)波动转移到非关键负载上<sup>[3]</sup>。



图 1 电力弹簧拓扑与控制框图 Fig.1 Topology and control block diagram of electrical spring

电力弹簧控制器主要包含一个交流比例-积分 (PI)环节和一个直流 PI 环节,交流 PI 环节保证关 键负载电压跟踪参考电压,从而维持其电压稳定实 现控制目标,考虑到 PI 环节无法直接跟踪交流量, 需先进行 dq 变换,在旋转坐标系下,分解为直流分 量然后进行跟踪控制;直流 PI 环节则维持直流支撑 电容电压稳定,从而保证电力弹簧得以稳定地与配 电网络进行能量流动。电力弹簧端电压  $\dot{U}_{es}$ 与非关 键负载电流  $\dot{I}_{s}$ 的相角差为±90°,其符号由电力弹 簧的工作模式确定。此外为了维持直流侧电容电压 稳定,电力弹簧会吸收少量的有功功率,开关损耗也 会造成部分有功功率损耗,这些因素最终也会对电 力弹簧的电压相角造成较小的偏差<sup>[7]</sup>。

和机械弹簧类似,电力弹簧也具有三种不同的 工作模式:感性模式、阻性模式和容性模式。

感性模式:电力弹簧输出电压 Ü<sub>es</sub>超前非关键 负载电流 İ<sub>3</sub>的角度为 90°。关键负荷电压高于需要 的控制电压,发电量高于负载需求,需要降低关键负 荷电压的运行模式,如附录 A 图 A1(a)所示。

容性模式:电力弹簧输出电压 Ū<sub>es</sub>滞后非关键

负载电流 *I*<sub>3</sub>的角度为 90°。关键负荷电压低于需要的控制电压,发电量低于负载需求,需要升高关键负荷电压的运行模式,如附录 A 图 A1(b)所示。

阻性模式:电力弹簧输出电压  $\dot{U}_{es}$ 等于 0。关键 负荷电压等于需要的控制电压,发电量刚好满足负 载需求的运行模式。

## 2 稳态运行范围分析

稳态运行范围是电力弹簧运行控制的重要参量。由图 1 中电力网络拓扑可以得到:

$$\dot{U}_{\rm G} = \dot{U}_{\rm s} + \dot{I}_{\rm 1} Z_{\rm 1} \tag{1}$$

$$\dot{U}_{\rm s} = \dot{U}_{\rm 0} + \dot{U}_{\rm es} \tag{2}$$

$$\dot{I}_{1} = \dot{I}_{2} + \dot{I}_{3} = \frac{\dot{U}_{s}}{Z_{2}} + \frac{\dot{U}_{0}}{Z_{3}}$$
(3)

将式(3)代人式(1)可以整理得到:

$$U_{\rm G} = V_{\rm a} + V_{\rm b}$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{\rm a} = \dot{U}_{\rm s} \left( 1 + \frac{Z_{\rm 1}}{Z_{\rm 2}} \right) \\ \dot{V}_{\rm b} = \frac{Z_{\rm 1}}{Z_{\rm 3}} \dot{U}_{\rm 0} \end{cases}$$

$$(5)$$

在网络中,各元件参数表达式如下:

$$\begin{cases} Z_{1} = R_{1} + j\omega L_{1} = |Z_{1}| \angle \varphi_{1} \\ Z_{2} = R_{2} + j\omega L_{2} = |Z_{2}| \angle \varphi_{2} \\ Z_{3} = R_{3} + j\omega L_{3} = |Z_{3}| \angle \varphi_{3} \end{cases}$$
(6)

由式(1)至式(3)可以画出各变量之间的相量 图,如附录 A 图 A1 所示,其中:

$$\dot{U}_{\rm s} = U_{\rm s} \angle 0^{\circ} \tag{7}$$

$$\dot{I}_3 = I_3 \angle \theta \tag{8}$$

由此可以确定式(5)中V<sub>a</sub>为常量,其大小方向 仅与控制电压和网络参数有关。

$$\dot{U}_{0} = \frac{\mid U_{s} \mid \cos \theta}{\cos \varphi_{3}} \angle (\varphi_{3} + \theta)$$
(9)

将式(9)代入式(5)可以整理得到:

$$\dot{V}_{\rm b} = \frac{\mid Z_1 \mid}{\mid Z_3 \mid} \frac{\mid U_{\rm s} \mid \cos \theta}{\cos \varphi_3} \angle (\varphi_1 + \theta) \qquad (10)$$

可以看出,在式(10)中只存在一个变量 $\theta$ ,其变 化范围为( $-\pi/2,\pi/2$ )。假设线路阻抗中 $\omega L_1 \gg R_1$ ,则 $\varphi_1 \approx \pi/2$ ,从而得到一个含一个虚点( $\theta \neq \pm \pi/2$ )的圆形轨迹,如图2所示。





此外,由式(4)、式(5)和式(10)不难发现, $\theta$ 与 网侧电压 $\dot{U}_{G}$ ——对应,即网侧电压 $\dot{U}_{G}$ 轨迹为圆, 设圆心为M,半径为r,则有:

$$\begin{cases} \overrightarrow{OM} = \dot{V}_{s} + \frac{1}{2} \frac{|Z_{1}|}{|Z_{3}|} \frac{|U_{s}|}{\cos \varphi_{3}} \angle \varphi_{1} \\ r = \frac{1}{2} \frac{|Z_{1}|}{|Z_{3}|} \frac{|U_{s}|}{\cos \varphi_{3}} \end{cases}$$
(11)

由图 2 可以看出,对于电力弹簧而言,其调节能 力是有限的,当且仅当网侧电压在轨迹范围内系统 可以达到稳定。由图 2 还可以发现,所得到的轨迹 是一个封闭的曲线,所以如果以原点为圆心,某一长 度为半径作圆(半径即为网侧供电电压幅值),就可 能出现三种可能:没有交点、一个交点和两个交点。 以原点为圆心,作两个圆分别与圆轨迹相切(一个内切,一个外切),切点分别为 $C(r_1, \theta_1)$ 和 $E(r_2, \theta_2)$ 。由圆的几何性质可知,原点O, C, M, E四点 共线。

第一种情况, |OC | <U<sub>G</sub> < |OE | 时,其中, |OC | 表示线段 OC 的长度,其他依此类推,存在两 个交点,这意味着,电力弹簧可以通过调节使目标母 线电压稳定到控制电压水平,但是将出现两个稳定 点。

第二种情况,U<sub>G</sub><|OC|或者U<sub>G</sub>>|OE|时,不存在交点,这就意味着,目标电压超出了电力弹簧调节能力,系统在电力弹簧的调节下,无法稳定到控制电压水平。

第三种情况,U<sub>G</sub>=|OC|或者U<sub>G</sub>=|OE|时,一 个交点,这就意味着,电力弹簧可以调节使目标母线 电压稳定到控制电压水平,且仅存在唯一的稳定点, 即为可调节电压的临界点。

在电力弹簧的网侧电压相量轨迹图上还有两个 特殊点 B 和 D, D 点对应 $\theta = 0$ ,即电力弹簧阻性工 作模式点,而 B 点对应 $\theta = \pm \pi/2$ ,该点是圆轨迹的 虚点(无定义点,不包含在轨迹上)。直线 BD 将圆 轨迹分成两部分:弧 BCD 和弧 BED。轨迹上弧 BCD 对应 $\theta \in (0, \pi/2)$ ,此时电力弹簧工作于容性 模式;轨迹上弧 BED 对应 $\theta \in (-\pi/2, 0)$ ,此时电力 弹簧工作于感性模式。

由前文分析可知, |OC | <U<sub>G</sub> < |OE | 时, 电力 弹簧可以调节使目标母线电压稳定到控制电压水 平,但是系统存在两个稳定点。这样的系统显然是 不理想的,如果不加控制可能会引起系统不稳定问 题,所以需要进一步优化。

考虑的优化原则是 θ 小优先。当 θ 取较大值 时,电力弹簧的电压幅值将会很大,而此时非关键负 载的电压变得很小,这样将会造成非关键负载无法 安全运行,因此,为了尽量保证非关键负载的运行需 求,舍去较大的 θ 对应的稳定点,而取 θ 值较小对应 的稳定点作为系统稳定点。

根据稳定点的落点区域,分为三种情况: ① $|OC| < U_G < |OB|$ ,此时落点均在弧 BCb上,即 容性工作模式区,且对称分布在 C点两侧,根据  $\theta$ 小优先原则,弧 BC上的点均不符合;② $|OD| < U_G < |OE|$ ,此时落点均在弧 dED上,即感性工作 模式区,根据  $\theta$  小优先原则,弧 dE上的点均不符 合;③ $|OB| < U_G < |OD|$ ,此时落点分别落在弧 bD和弧 Bd上,根据  $\theta$  小优先原则,弧 Bd上的点均不符 符合。

综上可知:电力弹簧系统工作轨迹为弧 CDE,

其中, 弧 *CbD* 为容性工作模式区, 弧 *DE* 为感性工作模式区, 如图 2 蓝色和红色实线所示。

在蓝色和红色实线所示轨迹中,网侧电压幅值  $U_{\rm G}$ 与 $\theta$ ——对应,即对于稳态运行范围内任—电压 值,与之对应的非关键负载电压存在且唯一,系统存 在唯一的稳定点。弧 CDE 所对应的网侧电压范围 即为电力弹簧的稳态运行范围,且当 $|OC| \leq U_{\rm G} <$ |OD|时,电力弹簧工作于容性模式,当 $|OD| < U_{\rm G} \leq |OE|$ 时,电力弹簧工作于感性模式。

由式(5)和式(10)可知,如果网络参数不发生变 化,稳态情况下,关键负载电压幅值与网侧电压幅值 范围线性相关。如图3所示,当关键负载电压幅值 波动时,网侧电压轨迹相应地进行线性变换。对于 关键负载,由于其一般对电压质量要求较高,其安全 运行允许的电压波动范围很小。本文在计及关键负 载电压允许波动范围情况下,分析电力弹簧的稳定 运行范围。



图 3 含越限情况的网侧电压轨迹 Fig.3 Locus of network voltage including out-of-limit condition

考虑关键负载电压可以小幅度波动情况,不妨 假设其波动限值为 $N_1$ 。如图 3 所示,其中圆 BCE 为 $U_s$ 等于标准值 $V_s$ 时的网侧电压轨迹圆,圆  $B_1C_1E_1$ 为 $U_s$ 等于 $U_{s1}$ 时的网侧电压轨迹圆,其中  $U_{s1} < V_s$ 。由式(4)、式(5)和式(11)可知, $\triangle MCB \sim \triangle M_1C_1B_1$ ,即当关键负载电压变化时,网侧电压轨 迹圆相应变化,但是圆心始终在射线 OE 上。当负 载电压下降时,边界点 C 沿直线 MO 向 O 点移动, 同理可以分析得到,负载电压上升时,边界点 E 沿 直线 OM 向 M 外侧移动。

为保证关键负载电压尽量靠近控制的标准值, 以关键电压波动最小为优化目标,在关键电压可波 动情况下,分析最优的网侧电压轨迹,建立优化数学 模型如下:

$$\begin{cases} \min(U_{s} - V_{s}) \\ \text{s.t.} \quad U_{G} = \left| \dot{U}_{s} \left( 1 + \frac{Z_{1}}{Z_{2}} \right) + \right. \\ \left. \frac{\left| Z_{1} \right|}{\left| Z_{3} \right|} \frac{\left| U_{s} \right| \cos \theta}{\cos \varphi_{3}} \angle (\varphi_{1} + \theta) \right| \\ \left. (1 - N_{1}) V_{s} \leqslant U_{s} \leqslant (1 + N_{1}) V_{s} \\ \left. U_{G\min} \leqslant U_{G} \leqslant U_{G\max} \right. \end{cases}$$

式中:U<sub>Gmax</sub>和 U<sub>Gmin</sub>分别为含越限情况下的网侧电 压上、下限。

首先分析当 $U_G$ 满足 $U_{Gmin} < U_G < |OE|$ 的情况。 当 $|OC| < U_G < |OE|$ 时, $U_s = V_s$ ,式(12)满足最优, 此时根据前文分析可知, $U_G$ 轨迹为弧CDE。当  $U_{Gmin} < U_G < |OC|$ 时, $U_s < V_s$ ,此时当 $U_G$ 轨迹在线 段 $CC_1$ 上时,式(12)满足最优。

当 $U_{Gmin} < U_G < |OC|$ 时,以O为圆心、 $U_G$ 为半径画弧,交圆 $C_1B_1E_1$ 于p点,交线段 $C_1C$ 于c点。 经过c点的圆弧轨迹对应的关键电压为 $U_{SX}$ ,由  $|OC_1| < |Oc|$ 得到,当 $U_G = |OC|$ 时,式(12)满足最 优,此时min $(U_s - V_s) = |U_{SX} - V_s|$ 。当 $U_{Gmin} < U_G < |OC|$ 时,可以得到 $U_G$ 轨迹为线段 $CC_1$ 。同理 可以分析得到当 $|OE| < U_G < U_{Gmax}$ 时, $U_G$ 轨迹为线 段 $EE_2$ 。

综上可得,当关键负载电压允许在 $(1\pm N_1)V_s$ 范围内波动时,网侧电压 $U_G$ 的轨迹为线段 $C_1C+$ 弧CDE+线段 $EE_2$ 。特别地,在关键负载电压发生偏离时,网侧电压与关键负载电压的相角差为定值。 基于以上分析可以给出关键负载电压幅值设定值优化计算方法,如式(13)所示。

$$V_{\text{ref}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{G}}}{\mid OC \mid} V_{\text{s,ref}} & U_{\text{G}} < \mid OC \mid \\ V_{\text{s,ref}} & \mid OC \mid \leqslant U_{\text{G}} \leqslant \mid OE \mid \\ \frac{U_{\text{G}}}{\mid OE \mid} V_{\text{s,ref}} & U_{\text{G}} > \mid OE \mid \end{cases}$$

$$(13)$$

以上讨论的情况,未考虑到非关键负载电压幅 值的限制。如果为保证非关键负载电压正常工作, 需要对非关键负载电压的波动范围也进行限制的 话,电力弹簧稳态运行范围也会受到影响。

不妨假设非关键负载可以接受的波动上限为 N<sub>2</sub>,由式(12)可以得到:

 $|\theta| \leq \arccos((1 - N_2) \cos \varphi_2)$  (14) 由式(4)、式(5)和式(10)可以得到对应的网侧

# 电压轨迹和电力弹簧稳态运行范围。

#### 3 仿真实验验证

为验证上述稳态分析的正确性,本文首先基于

MATLAB/Simulink 平台搭建了电力弹簧的配电 网络仿真模型对分析结果进行了验证,并基于 LabVIEW/PXI 平台设计硬件在环仿真实验进一步 对分析结果进行了验证。仿真实验原理图如图 1 所 示,以恒压源  $U_{\rm G}$ 代替电网侧经  $Z_1$ 向系统供电,电力 弹簧与非关键负载  $Z_3$ 串联,并联连接关键负载  $Z_2$ 。 为简化实验设计,本文选用了阻性负载。实验仿真 参数见附录 A 表 A1。

#### 3.1 基于 MATLAB/Simulink 仿真验证

首先根据系统仿真参数计算出系统稳态运行范 围。网侧电压波动上限为 8.7%(239.17 V),下限为 -1.6%(215.96 V)。当网侧电压值为 231.26 V时, θ=0,电力弹簧处于阻性工作模式。

在仿真实验中,设计了7个电压等级分别为: ①210 V; ②215.96 V; ③226 V; ④231.26 V; ⑤235 V; ⑥239.17 V; ⑦242 V。其中,电压等级② ⑥为边界验证,电压等级③④⑤为工作模式验证,电 压等级①⑦为越上下限情况下关键负载电压设定值 优化计算方法验证。

由图 4 仿真结果可以看出:在电压等级②⑥对 应的边界网侧电压下,系统均能通过电力弹簧调节 使关键负载电压达到标准电压 220 V;电压等级① ②③下,系统稳定后,非关键负载电流超前电力弹簧 端电压 90°,电力弹簧工作在容性模式;电压等级⑤ ⑥⑦下,系统稳定后,非关键负载电流滞后电力弹簧 端电压 90°,电力弹簧工作在感性模式;电压等级④ 下,系统稳定后,电力弹簧输出电压为零,电力弹簧 工作在阻性模式,该结论与理论分析一致。



Fig.4 Simulation results

图 5 为电压等级①⑦下, 网侧电压越下限和越 上限两种情况时, 系统的运行观测结果。由图可知, 在网侧电压越限情况下系统能够稳定运行, 电力弹 簧继续正常工作, 但是关键负载电压发生了偏移。 该结论与理论分析一致。



over lower and upper limit

#### 3.2 基于 LabVIEW/PXI 硬件在环仿真验证

本文基于 LabVIEW/PXI 构建电力系统的实时仿真平台,其硬件架构如附录 A 图 A2 所示。

在该平台实现算例的实时仿真涉及三类硬件模 块与三种软件组件之间硬、软件的配合。将参数设 置、实时波形分析等工作置于上位机中,将系统电路 状态量的计算等工作置于实时控制器中,将参考波 与载波的比较计算(即脉宽调制的产生过程)置于外 设的现场可编程门阵列板卡中,并通过示波器观测 实时波形。

在实时平台上完成了电压等级①③④⑤⑦下的 实验,得到的实时波形如附录 A 图 A3 所示。①③ 条件下,电力弹簧工作在容性模式,而⑤⑦条件下, 电力弹簧工作在感性模式,在①⑦电压越限情况下, 关键负载电压能稳定但会发生偏移,其结果与图 4 中 Simulink 纯软件仿真的结果一致,同样验证了分 析结果的正确性。 针对网侧电压越限造成电力弹簧失灵问题,本 文提出了一种利用几何方法结合相量图,分析电力 弹簧稳态运行范围的方法,同时分析了电力弹簧越 限失灵的机理,并提出在网侧电压越限条件下电力 弹簧关键负载电压设定值优化计算方法,最后通过 设计纯软件仿真与实时仿真实验对理论分析进行了 验证,得到以下结论。

1)受电网及自身参数限制,电力弹簧可调节网 侧波动范围是有限的。稳态情况下,以关键负载电 压为参考量,网侧电压落在圆轨迹上,圆轨迹上的点 到原点距离的范围即为电力弹簧的稳态运行范围。

2)电力弹簧稳态运行轨迹为半圆弧,以阻性工 作点为界,分为容性工作模式区和感性工作模式区。

3)对电力弹簧关键负载电压设定值进行适当的 优化,可以扩大电力弹簧稳定运行范围,有利于解决 现有控制方法在网侧电压越限条件下的电力弹簧失 灵问题。

4)本文所研究对象为无源型电力弹簧,其对系统补偿方式较为单一,而有源型电力弹簧以及具有 多象限功率补偿方式的新型拓扑电力弹簧在微电网 中应用更加灵活,下一步将继续完善不同类型电力 弹簧的运行范围及控制方法的研究。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

## 参考文献

[1] HUI S Y, LEE C K, WU F F. Electric springs—a new smart grid technology[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552-1561.

- 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]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 15-19, 2013, Denver, Colorado, USA: 5253-5257.
- [3] 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.
- [4] CHI K L, SHU Y H. Reduction of energy storage requirements in future smart grid using electric springs[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(3): 1282-1288.
- [5] YAN S, TAN S C, LEE C K, et al. Electric springs for reducing power imbalance in three-phase power systems [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 30(7): 3601-3609.
- [6] AKHTAR Z, CHAUDHURI B, SHU Y R H. Primary frequency control contribution from smart loads using reactive compensation[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2015, 6(5): 2356-2365.
- [7] LUO X, AKHTAR Z, LEE C K, et al. Distributed voltage control with electric springs: comparison with STATCOM[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2015, 6(1): 209-219.
- [8] YAN S, LEE C K, YANG T B, et al. Extending the operating range of electric spring using back-to-back converters: hardware implementation and control [ J ]. IEEE Trans on Power Electronics, 2017, 32(7): 5171-5179.

程益生(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:微电 网分析与控制。E-mail: chengyisheng@sjtu.edu.cn

陆振纲(1985—),男,硕士,工程师,主要研究方向:柔性 输配电系统分析设计技术与应用。E-mail: luzhengang@ geiri.sgcc.com.cn

汪可友(1979—),男,通信作者,副教授,博士生导师,主 要研究方向:电力系统分析与控制、新能源的不确定性分析。 E-mail: wangkeyou@sjtu.edu.cn

(编辑 万志超)

#### Analysis on Steady-state Operating Range and Off-limits Malfunction Mechanism of Electrical Spring

CHENG Yisheng<sup>1</sup>, LU Zhengang<sup>2</sup>, WANG Keyou<sup>1</sup>, ZHAO Guoliang<sup>2</sup>, HUANG Xin<sup>1</sup>, LIU Jinsong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation (Shanghai Jiao Tong University),

Ministry of Education, Shanghai 200240, China; 2. National Key Laboratory for Advanced Transmission Technology

(Global Energy Interconnection Research Institute), Beijing 102211, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** With the background and basic principle of the electrical spring (ES) described, the modulability of ES is analyzed at length by the vector diagram method, and the operation range of the line voltage under which ES can work is investigated. Besides, the malfunction mechanism is analyzed, and a new computational method for optimizing the specified value of critical load voltage is found. When the line voltage changes in the range, the critical load voltage can be stabilized on the standard value by ES, but when changes are beyond the range, the ES will break down, and the critical load voltage will deviate from the standard state, or even the system can become unstable. Given the permissible fluctuation range of the critical load voltage, the expanded safety regulation domain of the ES system can be obtained by optimizing the specified value of the critical load voltage. Finally, the analysis results are validated by simulation and experiment results.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900504) and State Grid Corporation of China.

Key words: electrical spring (ES); steady-state operating range; off-limits malfunction; phasor analysis