

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2019.06.010

计及非关键负载接入量的电力弹簧配置方法

吕潇, 吴薛红, 马刚

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要:在“颠簸”的电网中,电力弹簧(ES)将电压的波动转移到非关键负载上,可实现用电量跟随发电量变化,有效缓解新能源发电的不稳定性带来的问题。但大量地投入非关键负载以追求ES稳压效果,势必会给电网带来新的安全隐患,目前在ES应用配置方面的研究还较少。文中首先阐述了ES的基本原理,分析了其在区域电网中对母线电压的调节机理,然后建立了ES应用配置数学模型,揭示了非关键负载接入量与ES发出无功的定量关系,并提出一种非关键负载接入量最小的ES配置方法。算例结果表明,通过该方法得到非关键负载最小占比,形成经济合理的配置方案,验证了配置方法的正确性和有效性。

关键词:ES;配置方法;电压调节;无功调节;非关键负载

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)06-0069-08

0 引言

在化石能源危机和环境污染的双重压力下,以可再生能源为主的分布式发电技术凭借着自身的优点受到高度重视^[1],其中,风力发电因建设周期短等特点脱颖而出^[2]。基于风电在中国迅速发展的背景,文中将风电作为分布式电源进行研究。分布式发电优点突出,但其接入电网会影响电能质量指标^[3],引入大量谐波^[4],导致供电可靠性下降^[5]等问题。针对电网电压的波动,无功补偿^[6-7]是最常应用的技术,但其无法调节有功功率,无法解决频率下降等问题^[8-9]。针对新能源发电的间歇性特点,利用蓄电池储能等储能技术^[10]来抵消发电量与用电量的差量是解决此问题的方法之一,但效果较差^[11]。

针对上述问题,电力弹簧(electric spring, ES)这一概念被提出^[12],其在“颠簸”的电网中使得关键负载上的电压波动被控制在规定的范围内,同时将电压的波动转移到非关键负载上,实现发电量与用电量的自动平衡。需要精确电压供电的电力负载称为关键负载,允许宽电压范围输入的电力负载称为非关键负载^[13]。文献[14]中阐述了ES的基本概念、工作原理以及在电力系统中的应用。ES与非关键负载串联组成智能负载(smart load, SL)^[15],从而调节关键负载两端电压。非关键负载消耗的功率跟随分布式电源的功率波动而变化,从而平衡电力供应与需求^[16]。文献[17]提出了一种自适应PI控制器的ES稳压控制方法。文献[18]提出一种ES动态仿真模型,并首次提出ES调压效果取决于

非关键负载与关键负载相对比例,前者占比越高,ES稳压效果越明显。但是,大量地投入非关键负载接入ES以追求ES稳压效果,势必会给电网带来新的安全隐患。因此,当ES应用于系统时,还需一种能够得到非关键负载精确接入量的配置方法,形成合理、有效、经济的配置方案,保障ES运行。

综上,文中以ES应用于系统中经济有效的配置方案为目标,首先阐明ES基本原理,分析ES在区域电网中对母线电压的调节机理。然后,建立ES应用配置数学模型,揭示非关键负载接入量与ES发出无功的定量关系;研究非关键负载接入量最小的ES配置方法,精确寻找非关键负载最小接入量,得到非关键负载最小占比,形成ES配置方案,保证关键负载电压基本恒定不变。最后,通过算例分析和实验结果验证了文中配置方法的正确性和有效性。

1 ES原理

图1为ES的工作原理简图,其中虚线框内电路代表ES,主要包括一个双极性多种脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)单相半桥逆变电路和一个LC低通滤波器。 L_f, C_f 分别为低通滤波器中的感抗和容抗,用于滤除高频的PWM信号; V_{ES} 为由ES产生并注入系统母线的电压; I_{NC} 为流经非关键负载的电流。

假设忽略逆变器本身的功率损失,半桥逆变电路的基频电压公式为:

$$\begin{cases} V_{ES}(t) = \frac{V_{dc}}{2} m(t) \\ m(t) = M \sin(100\pi t \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2019-06-02;修回日期:2019-07-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51607093)

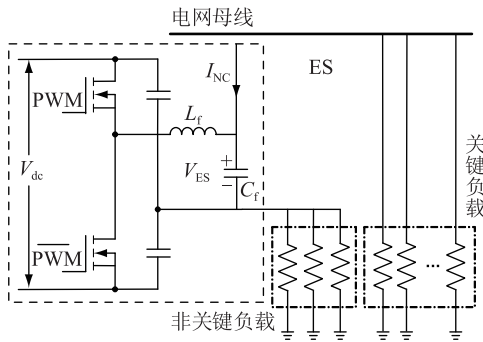


图1 ES工作原理

Fig.1 Working principle of electric spring

式中: $m(t)$ 为调制函数; M 为调制系数; V_{dc} 为半桥逆变电路输入电压。

负载被分为两类:关键负载与非关键负载。ES与非关键负载串联组成SL,可以保证关键负载两端的电压和输送的功率基本恒定不变。根据基尔霍夫电压定律,ES电压 V_{ES} 、非关键负载电压 V_{NC} 以及关键负载电压 V_C 的相量关系为:

$$V_C = V_{NC} + V_{ES} \quad (2)$$

对于实现电压稳定控制的ES,其作为无功调节装置用以吸收或发出无功功率。因此,ES产生的电压 V_{ES} 与其自身流过的电流 I_{NC} 呈正交关系。规定满足关键负载供电要求的精确电压为设定值 $V_{C,ref}$,ES有3种不同的工作模式,定义如下:

(1) 阻性模式。当母线电压等于设定值时, V_{ES} 为零,ES不进行无功补偿。

(2) 容性模式。当系统电压不满足额定电压的要求,母线电压低于设定值时, I_{NC} 超前 V_{ES} 90° ,ES实现电压提升作用, V_C 上升并恢复到设定值水平。

(3) 感性模式。当母线电压高于设定值时, I_{NC} 滞后 V_{ES} 90° ,ES实现降压作用,非关键负载吸收过剩的无功功率, V_C 维持在设定值的水平。

ES的3种不同的工作模式的向量关系如图2所示。 V_{ES} 在容性模式和感性模式下的标量方程为:

$$V_{ES} = \begin{cases} -\frac{V_{dc}}{2}M & \text{容性模式} \\ \frac{V_{dc}}{2}M & \text{感性模式} \end{cases} \quad (3)$$

2 ES应用配置建模

ES应用系统如图3所示,区域电网给下级负荷供电,分布式电源产生的波动的功率通过与系统相连的节点注入供电线路,线路阻抗为集中式R-L阻抗网络。

ES作用于调节无功功率,其发出的有功功率几

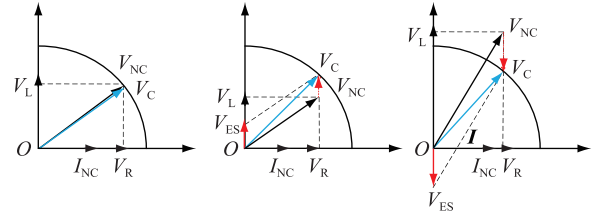


图2 3种工作模式下ES和阻感负载的向量

Fig.2 Vectors of electric spring in three working modes with resistance-inductor load

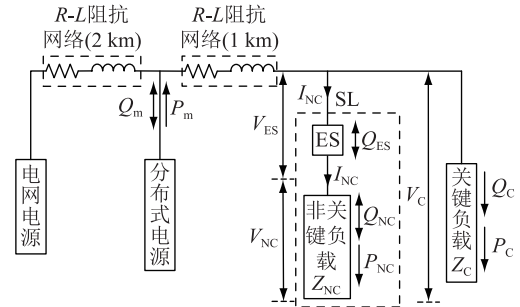


图3 ES应用系统

Fig.3 Electric spring in the application system

乎为零,所以SL的有功功率 P_{SL} 可以等同于非关键负载的有功功率 P_{NC} 。此系统中包含传统的发电单元(如火力发电)以及可再生能源发电单元(如风力、光伏分布式发电),则系统中的实时有功功率将会在一个固定的有功功率 P_g 上叠加一个变化的有功功率 P_m ,如图4所示。

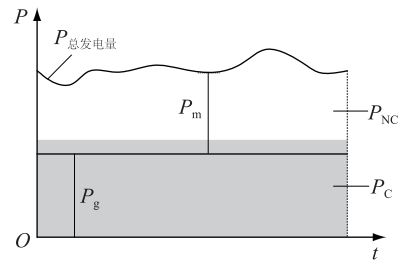


图4 发电和负载功率曲线分布

Fig.4 Power and load active power curve distribution

负载实时消耗的有功功率为关键负载和非关键负载消耗的有功总和。根据图4可以得到:

$$P_{total} = P_g + P_m = P_{NC} + P_C = \frac{V_{NC}^2 \cos \varphi}{Z_{NC}} + \frac{V_C^2 \cos \theta}{Z_C} \quad (4)$$

式中: P_g 、 P_m 分别为电网电源和分布式电源发出的有功功率; Z_{NC} 、 V_{NC} 、 φ 、 P_{NC} 分别为非关键负载的阻抗、两端电压、功率因数角及其消耗的有功功率; Z_C 、 V_C 、 θ 、 P_C 分别为关键负载的阻抗、两端电压、功率因数角及其消耗的有功功率。

当ES接入系统正常运行时,关键负载接入处的母线电压将会稳定在设定的电压值,所以关键负

载所消耗的有功功率为一定值。根据能量守恒定律,由分布式电源造成的功率波动将通过非关键负载进行消纳。ES 根据功率波动实时改变其产生的电压矢量, V_{NC} 也随之改变,使得非关键负载消耗的有功可追踪波动的功率。因此,ES 的引入改变了传统用电量决定发电量的供电模式,实现了负载的能量消耗跟随新能源发电量而作出实时调节^[12]。

根据图 3,流经非关键负载的电流值 I_{NC} 为:

$$I_{NC} = \frac{V_{NC}}{Z_{NC}} \quad (5)$$

由式(3)可知 V_{ES} 的正负取决于 ES 的工作模式,设定 h 为 ES 的工作模式系数,当 ES 工作在容性模式时, $h = -1$; 当 ES 工作在感性模式时, $h = 1$ 。此处需要说明的是,为保证在系统实际运行的过程中,当 ES 以任一容量参与调节时文中方法所形成的配置方案仍能有效、可靠,调制系数 M 取其最大值 1,使得 ES 以最大容量参与调节,此时 ES 注入系统母线的电压为 V_{ES_max} :

$$\begin{cases} V_{ES} = h \frac{V_{dc}}{2} M \\ V_{ES_max} = h \frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

根据图 3、式(5)和式(6),可知系统中 ES 发出的无功功率 Q_{ES} 以及负载部分吸收的无功功率 Q 分别为:

$$\begin{cases} Q_{ES} = \frac{hV_{NC}V_{dc}}{2Z_{NC}} \\ Q = \frac{hV_{NC}V_{dc}}{2Z_{NC}} + \frac{V_{NC}^2 \sin\varphi}{Z_{NC}} + \frac{V_C^2 \sin\theta}{Z_C} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)即为 ES 应用配置数学模型,揭示了用于稳压控制的 ES 发出的无功功率与非关键负载接入量的定量关系。

接入 ES 的非关键负载在总负载中所占的比例称为非关键负载占比。在 ES 有效实现稳压功能的前提下,用于“牺牲”的非关键负载接入量越小,荷侧针对 ES 的用户舒适度越佳。ES 中半桥逆变器的输入电压 V_{dc} 常取定值,则 ES 注入系统母线的电压 V_{ES_max} 也为定值。因此,在 ES 调节能力未超过其上限以及接入负载的电压未超过允许偏移范围的前提下,接入 ES 的负载越多,ES 对负载整体的无功调节量越大,进一步地,非关键负载占比越大,ES 对关键负载的稳定效果也越好。但是,大量地投入非关键负载接入 ES 以追求 ES 稳压效果,势必会造成“牺牲”的负载过多、用户舒适度降低的现象,也会给接入 ES 的负载带来安全隐患。

3 非关键负载接入量最小的 ES 配置方法

文中提出一种非关键负载接入量最小的配置方法。如图 5 所示,在所有纯阻性负载中,将工作电压允许偏移范围 $\Delta V'_{NC}$ 较大的负载归为非关键负载,取部分非关键负载接入 ES,组成智能负载用于解决其余负载的电压波动问题,其余负载均可视为关键负载。

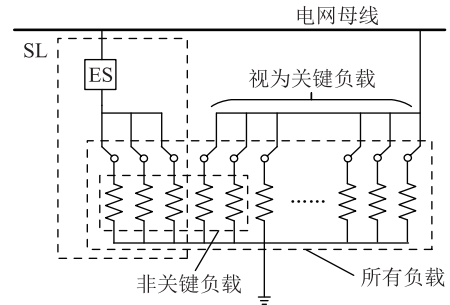


图 5 非关键负载最小接入量

Fig.5 Minimum input of non-critical load

该方法旨在保证关键负载两端的电压和输送的功率基本恒定不变,同时求取接入 ES 的非关键负载最小接入量,得到非关键负载最小占比,形成经济有效的配置方案,保障 ES 应用于系统后的荷侧用户舒适度。非关键负载接入量最小的 ES 配置方法如图 6 所示。

(1) ES 投入工作前,根据分布式电源发电数据记录,预估可能发生的功率最大波动,将其带入潮流计算^[19-20],求取负载接入处母线电压的最大波动范围。此处需要说明的是,由电压最大波动进一步得到非关键负载最小接入量,针对范围内的任一波动,均能保证关键负载的电压和功率基本恒定不变。

(2) 模拟 ES 在容性模式下工作,以母线电压波动范围的波谷值为调节起点。设定 ES 发出无功功率 Q_{ES} 的初始值为 a ,如式(8)。 a 取值越低,模拟误差越小。

$$Q_{ES}(k) = a \quad k = 1 \quad (8)$$

式中: k 为 ES 参与调节次数。

(3) 根据上述 ES 应用配置数学模型,可由式(9)求取此时接入 ES 的非关键负载阻值 R_{NC} :

$$R_{NC} = \frac{V_{dc} \sqrt{4V_C^2 - V_{dc}^2}}{4Q_{ES}} \quad (9)$$

同时检验该负载电压偏移量 ΔV_{NC} 是否小于其所允许的偏移范围 $\Delta V'_{NC}$ 。若 ΔV_{NC} 超出此范围,根据式(2),降低 V_{dc} 的取值后重新进行本步骤。

智能负载组成后,可根据各负载之间的并联关系求取关键负载的阻值 R_C ,如式(10)所示,并由式

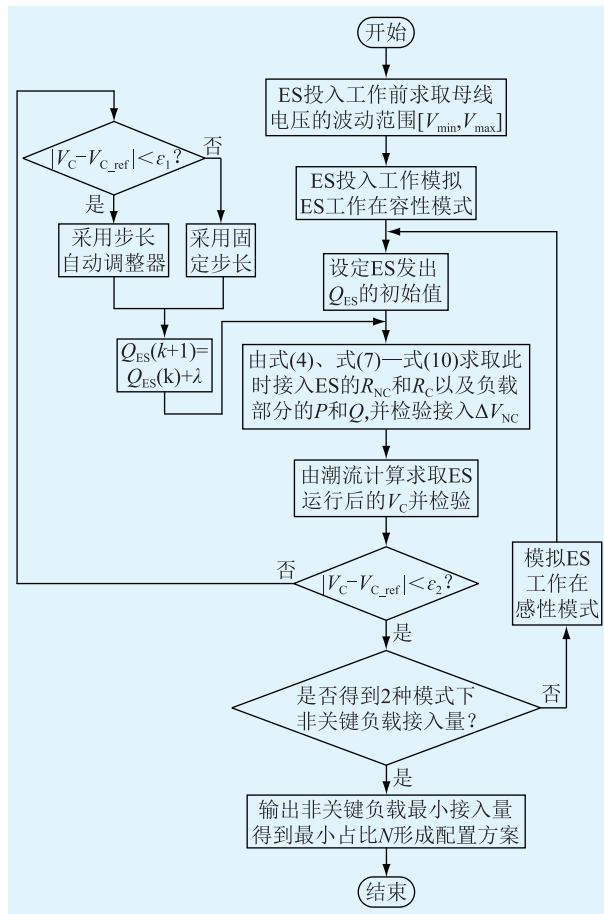


图6 非关键负载接入量最小的ES配置方法

Fig.6 Flow chart for the configuration method of electric spring with minimum input of non-critical load

(4)、式(7)求取负载部分吸收的有功功率 P 和无功功率 Q 。

$$R_C = \frac{R_L R_{NC}}{R_{NC} - R_L} \quad (10)$$

式中： R_L 为负载总阻值。

(4) 将负载部分的功率值再次带入潮流计算，求取ES运行后关键负载接入处的母线电压 V_C ，并检验该值是否到达设定值 V_{C_ref} 的水平。此处设定门限值 ε_1 和 ε_2 ，决定了ES对母线电压的调节精度，常量 ε_1 和 ε_2 需要根据实际的调节要求与系统特性取值。

(5) 当ES运行后的母线电压值与设定值差值绝对值 $|V_C - V_{C_ref}|$ 大于 ε_1 时，判定 V_C 未达到 V_{C_ref} 的水平，母线电压不满足关键负载的供电要求，表明需要增加ES发出的无功功率。继续判断 $|V_C - V_{C_ref}|$ 与 ε_2 的关系，这决定了ES发出的无功的变化步长 λ 。若 $|V_C - V_{C_ref}|$ 大于 ε_2 ，则采用固定的步长增大 Q_{ES} ，从而逼近非关键负载最小接入量，设定步长为ES发出无功的初始值：

$$\lambda = a \quad (11)$$

反之 $|V_C - V_{C_ref}|$ 小于或等于 ε_2 ，引入步长自动调整器，此处设定灵敏度 t ，步长 λ 的自动调整器的表达式为：

$$\lambda = t |V_C - V_{C_ref}| \quad (12)$$

式中： t 决定了步长自动调整器的柔韧性，根据经验取 $t = a/2$ 。该步长自动调整器使得 $|V_C - V_{C_ref}|$ 越接近 ε_1 时， Q_{ES} 增长越慢，可精确寻找非关键负载最小接入量，避免固定步长直接寻找最小接入量带来的接入量误差。如式(13)，将原 Q_{ES} 与步长 λ 之和作为下一次ES发出的无功，重复步骤(3)和(4)。

$$Q_{ES}(k+1) = Q_{ES}(k) + \lambda \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

(6) 当 $|V_C - V_{C_ref}|$ 小于或等于 ε_1 时，判定 V_C 达到 V_{C_ref} 的水平，母线电压满足关键负载的供电要求，此时得到容性模式下的非关键负载最小接入量，如图7所示。

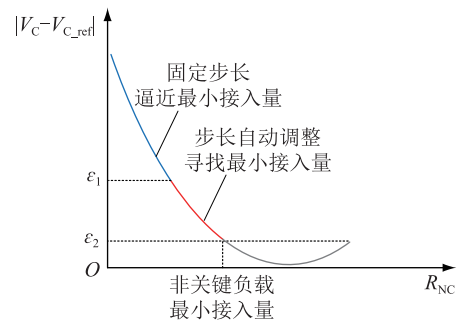


图7 非关键负载最小接入量求解

Fig.7 Solving the minimum input of non-critical load

(7) 继续判断是否得到2种工作模式下的非关键负载最小接入量。若仅得到一种工作模式下的接入量，那么模拟ES在感性模式下工作，以母线电压波动范围的波峰值为调节起点。重复步骤(2)至步骤(6)，得到感性模式下的非关键负载最小接入量。

(8) 将2种工作模式下的最小接入量进行比较。由负载的并联关系可知接入的负载阻值越小，其数量越多，而接入ES的负载越多，ES稳压控制的效果越好。因此取两者中阻值较小的接入量为本方法最终的非关键负载最小接入量。最后，根据负载总阻值 R_L 和非关键负载最小接入量阻值 R_{NC} ，求取非关键负载最小占比 N ：

$$N = \frac{R_L}{R_{NC}} \quad (14)$$

在总负载中取数量占比为 N 的非关键负载接入ES，组成智能负载参与母线电压调节，形成非关键负载接入量最小的ES配置方案，能够保证关键负载的电压和功率基本恒定不变，最大程度地减少用于“牺牲”的负载，保障负荷侧用户舒适度。

4 算例分析

以接入分布式电源的一个区域电网为例,通过文中提出的配置方法,形成非关键负载接入量最小的ES配置方案。该区域的负载日耗电量约为2 400 kW·h,系统内部电源、线路及负载参数如表1所示,得到如图8所示的系统等效电路图。其中, R_L 为全部负载; R_{NC} 为接入ES的部分非关键负载; R_C 为均可视为关键负载的其余负载。

表1 系统参数
Table 1 System parameters

参数	数值
容量/(kV·A)	100
电源 短路容量/(kV·A)	36
电压水平/V	220
2 km 感抗/ μ H	96
2 km 电阻/ Ω	4×10^{-3}
线路阻抗 1 km 感抗/ μ H	48.8
1 km 电阻/ Ω	4×10^{-3}
负载 非关键负载/ Ω	0.5
关键负载/ Ω	

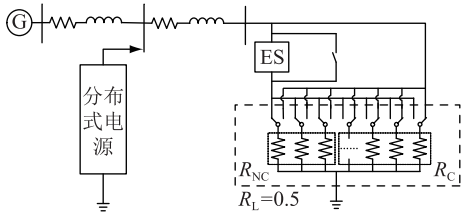


图8 算例系统等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of example system

算例分布式电源中采用随机数组模拟其产生的波动的功率,仿真可得 P_m 和 Q_m 的波动范围:

$$\begin{cases} P_m \in [-34\ 550, 0] \\ Q_m \in [-29\ 850, 7\ 316] \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_m 为有功功率,W; Q_m 为无功功率,var。

根据非关键负载接入量最小的ES配置方法,取 P_m 和 Q_m 各自的波峰、波谷值作为实际预估的功率最大波动,通过前推回带的潮流计算方法,求得负载接入处母线电压的波动范围:

$$V_C \in [212.26, 221.51] \quad (16)$$

设定算例中ES逆变电路具体参数见表2。

需要说明的是,非关键负载工作电压允许偏移范围的设定主要参考家庭中常见的允许宽电压输入的用电设备。如锂电池充电器输入交流电压为100~240 V^[21],用于整流稳压的东芝增强器输入交流电压为85~240 V^[22],故算例 $\Delta V'_{NC}$ 设定为70 V。

表2 配置方法设定参数
Table 2 Parameters of settings

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	290	$\Delta V'_{NC}$	70
M	1	ε_1	0.1
V_{C_ref}/V	220	ε_2	1
α/var	1 000	t	500

4.1 容性模式配置

模拟ES工作在容性模式下,以母线电压波动范围的波谷值为调节起点,实现电压提升作用。由式(8)和式(9)求取容性模式下ES第一次参与调节时,接入ES的负载阻值 R_{NC} 。由式(10)求取关键负载的阻值 R_C 。并由式(4)和式(7)求取负载部分整体的功率值,结果如下:

$$\begin{cases} Q_{ES}(1) = 1\ 000 \text{ var} \\ R_{NC} = 22.477 \ \Omega \\ R_C = 0.511 \ \Omega \\ Q = 1\ 000 \text{ var} \\ P = 89\ 171 \text{ W} \end{cases} \quad (17)$$

将负载部分的功率值代入潮流计算,求得负载接入处的母线电压:

$$V_C = 212.83 \text{ V} \quad (18)$$

对母线电压进行检验,检验结果如式(19)所示,ES第一次调节后母线电压不满足关键负载的供电要求,则采用固定的步长增加ES发出的 Q_{ES} ,进行第二次调节。将 $Q_{ES}(1)$ 与 λ 之和作为下一次ES发出的无功功率,重复步骤(3)和(4)。

$$\begin{cases} |V_C - V_{C_ref}| > \varepsilon_1 \\ |V_C - V_{C_ref}| > \varepsilon_2 \\ \lambda = 1\ 000 \end{cases} \quad (19)$$

在第26次调节后检验母线电压,检验结果见式(20),此时换用步长自动调整器,精确寻找最小接入量。将 $Q_{ES}(26)$ 与 λ 之和作为下一次ES发出的无功功率,重复步骤(3)和(4)。

$$\begin{cases} V_C = 219.01 \text{ V} \\ |V_C - V_{C_ref}| > \varepsilon_1 \\ |V_C - V_{C_ref}| < \varepsilon_2 \\ \lambda = 493.5 \end{cases} \quad (20)$$

在第45次调节后,经检验母线电压到达设定值 V_{C_ref} 的水平,结果如下:

$$\begin{cases} Q_{ES}(45) = 29\ 807 \text{ var} \\ R_{NC} = 0.804 \ \Omega \\ R_C = 1.322 \ \Omega \\ Q = 29\ 807 \text{ var} \\ P = 70\ 560 \text{ W} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} V_C = 219.91 \text{ V} \\ |V_C - V_{C_ref}| < \varepsilon_1 \\ |V_C - V_{C_ref}| < \varepsilon_2 \end{cases} \quad (22)$$

此时,得到容性模式下的非关键负载最小接入量为 0.804Ω ,详细计算结果如表 3 所示,而感性模式下的接入量未知。

表 3 容性模式下计算结果

调节次数 k	步长 λ	调节量 Q_{ES}/var	接入量 R_{NC}/Ω	偏移量 $\Delta V_{NC}/\text{V}$	调节后 V_C/V	$ V_C - V_{C_ref} $
1		1 000	24.477	64.99	212.83	7.17
2	1 000	2 000	11.295	64.21	213.08	6.92
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	1 000	25 000	0.948	56.18	218.76	1.24
26	1 000	26 000	0.914	55.86	219.01	0.99
27	493.45	26 493	0.898	55.71	219.13	0.87
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
44	61.34	29 752	0.123	54.71	219.89	0.11
45	54.16	29 807	0.804	54.69	219.91	0.09

4.2 感性模式配置

模拟 ES 在感性模式下工作,以母线电压波动范围的波峰值为调节起点,实现降压作用。重复步骤(2)至(6),不再赘述感性模式下的具体计算。

在第 32 次调节后,经检验母线电压到达设定值 V_{C_ref} 的水平,结果如下:

$$\begin{cases} Q_{ES}(54) = 9\ 044 \text{ var} \\ R_{NC} = 2.655 \Omega \\ R_C = 0.616 \Omega \\ Q = 9\ 044 \text{ var} \\ P = 88\ 970 \text{ W} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} V_C = 220.09 \text{ V} \\ |V_C - V_{C_ref}| < \varepsilon_1 \\ |V_C - V_{C_ref}| < \varepsilon_2 \end{cases} \quad (24)$$

此时,得到感性模式下的非关键负载最小接入量为 2.655Ω ,详细计算结果如表 4 所示。

4.3 结果验证

比较 2 种模式下最小接入量,取阻值为 0.804Ω 的非关键负载为算例的最小接入量。由式(14)可以求得算例的非关键负载最小占比 N ,如图 9(a)所示。文中为验证由最小占比 N 形成的配置方案在算例系统实际运行中的正确性和有效性,适量地减小非关键负载接入量,得到实验占比 N' ,如图 9(b)所示。

将 N 与 N' 各自形成的 ES 配置方案,带入到同

表 4 感性模式下计算结果

调节次数 k	步长 λ	调节量 Q_{ES}/var	接入量 R_{NC}/Ω	偏移量 $\Delta V_{NC}/\text{V}$	调节后 V_C/V	$ V_C - V_{C_ref} $
1		1 000	24.281	52.55	221.31	1.31
2	1 000	2 000	12.121	52.81	221.16	1.16
3	1 000	3 000	8.071	53.01	221.01	1.01
4	1 000	4 000	6.046	53.21	220.86	0.86
5	428.12	4 428	5.455	53.41	220.80	0.80
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31	55.06	8 993	2.670	54.40	220.10	0.10
32	50.86	9 044	2.655	54.41	220.09	0.09

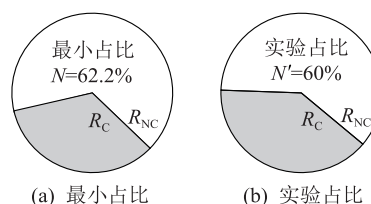


图 9 非关键负载最小占比

Fig.9 The minimum-proportion of non-critical load

一模型中进行仿真实验。实验结果如图 10 所示,以关键负载两端电压有效值作为评判因素,比较曲线 1 与曲线 2、曲线 3 可知,ES 接入系统可明显地稳定关键负载两端电压;比较曲线 2 与曲线 3 可知,由最小占比形成的 ES 配置方案为保证关键负载两端电压基本恒定不变的非关键负载接入量最少的配置方案。该方案避免了用于“牺牲”的非关键负载的浪费接入,保障了荷侧的用户体验度。算例仿真实验结果验证了文中非关键负载接入量最小的 ES 配置方法的有效性和准确性。

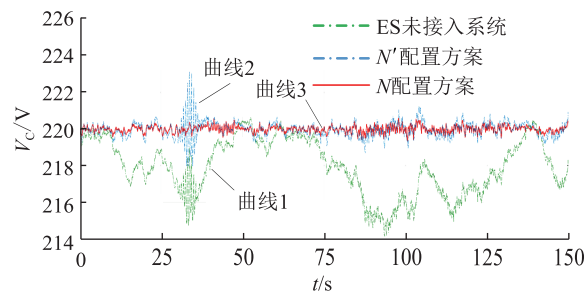


图 10 关键负载电压

Fig.10 Voltage across the critical load

5 结论

文中分析了 ES 的工作原理,建立了 ES 应用配置数学模型,提出一种非关键负载接入量最小的 ES 配置方法。通过研究,取得了以下结论:

(1) ES 与非关键负载组成智能负载接入系统,

能够有效地解决分布式电源带来的电压波动问题;

(2) 所提 ES 应用配置数学模型明确了非关键负载接入量与 ES 发出无功的定量关系;

(3) 所提非关键负载接入量最小的 ES 配置方案能够精确地寻找到非关键负载的最小接入量,形成经济合理的配置方案,保证关键负载电压基本维持在设定值的水平恒定不变,避免用于“牺牲”的非关键负载浪费接入,保障了荷侧的用户舒适度,为 ES 在未来的推广应用奠定了配置基础。

参考文献:

- [1] 范士雄,蒲天骄,刘广一,等. 主动配电网中分布式发电系统接入技术及其进展[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S2): 92-101.
FAN Shixiong, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Technologies and its trends of grid integration of distributed generation in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 92-101.
- [2] 李凯. 风力发电技术发展现状及趋势[J]. 低碳世界, 2016(28): 50-51.
LI Kai. Development status and trend of wind power technology [J]. Low Carbon World, 2016(28): 50-51.
- [3] 文娟,谭阳红,何怡刚,等. 含分布式电源的复杂配电网多阶段故障恢复方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3332-3341.
WEN Juan, TAN Yanghong, HE Yigang, et al. A multi-stage service restoration method for complex distribution networks with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3332-3341.
- [4] 苏玲,张建华,王利,等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [5] 吴治均,李明昆. 基于馈线路径集合的并网型微电网可靠性评估[J]. 电气技术, 2016, 17(10): 17-22.
WU Zhijun, LI Mingkun. Reliability evaluation of grid-connected micro-grid based on feeder path set methods[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(10): 17-22.
- [6] 雷二涛,尹项根,赖锦木,等. 配电变压器-静止同步补偿器的补偿机理及无源控制技术[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 284-293.
LEI Ertao, YIN Xianggen, LAI Jinmu, et al. Compensation mechanism and passivity-based control technology for distribution transformer-Static synchronous compensator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 284-293.
- [7] 董萍,徐良德,刘明波. 多站点无功补偿装置的多目标协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 587-595.
DONG Ping, XU Liangde, LIU Mingbo. Multi-objective coordinated control of reactive compensation devices among multiple substations [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 587-595.
- [8] 张轩,王海云,武家辉,等. 组合式无功补偿在哈密电网中的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(5): 30-35.
ZHANG Xuan, WANG Haiyun, WU Jiahui, et al. Study on application of combined reactive power compensation in Hami power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(5): 30-35.
- [9] 蒋琛,刘亚南,唐一铭,等. 区外故障引起的发电机功率突降保护误切机动作分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 159-164.
JIANG Chen, LIU Yanan, TANG Yiming, et al. Analysis of power sag protection operation caused by an external fault [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 159-164.
- [10] 李建林,马会萌,惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10.
- [11] 杨震,夏俐,管晓宏. 带有储能的可再生能源调度问题研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(7): 25-30, 50.
YANG Zhen, XIA Li, GUAN Xiaohong. Study on renewable energy dispatching with energy storage [J]. Smart Power, 2017, 45(7): 25-30, 50.
- [12] HUI S Y R, LEE C K, WU F. Electric springs—a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552-1561.
- [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] AREED E F, ABIDO M A. Design and dynamic analysis of electric spring for voltage regulation in smart grid[C]//International Conference on Intelligent System Application to Power Systems. 2015.
- [15] LEE C K, CHAUDHURI B, HUI S. Hardware and control implementation of electric springs for stabilizing future smart grid with intermittent renewable energy sources[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(1): 18-27.
- [16] 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]//Energy Conversion Congress & Exposition. IEEE, 2013.
- [17] GANG M, GUCHAO X, YIXI C, et al. Voltage stability control method of electric springs based on adaptive PI controller[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 95: 202-212.
- [18] CHAUDHURI N, LEE C, CHAUDHURI B, et al. Dynamic modeling of electric springs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2450-2458.
- [19] 张立梅,唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.

- ZHANG Limei, TANG Wei. Back/Forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [20] 周国伟,董建新,肖珊珊,等. 高压断路器弹簧操动机构典型故障应力分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(12): 93-99.
ZHOU Guowei, DONG Jianxin, XIAO Shanshan, et al. Typical fault stress analysis of spring operating mechanism of high-voltage circuit breaker [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12): 93-99.
- [21] 郑秀峰. 尼康 S9100 数码相机锂电池充电器工作原理与检修[J]. 家电维修, 2016(12): 31-32.
ZHENG Xiufeng. Nikon S9100 digital camera lithium battery charger working principle and maintenance [J]. Appliance Repairing, 2016(12): 31-32.
- [22] 程军,马吉伟. 医用影像增强器供电电源的代换[J]. 医疗装备, 2001, 14(10): 37-37.
CHENG Jun, MA Jiwei. Replacement of medical image intensifier power supply [J]. Medical Equipment, 2001, 14(10): 37-37.

作者简介:



吕潇

吕潇(1995),男,硕士在读,研究方向为电力弹簧优化控制及其应用技术(E-mail: nnulvxiao@126.com);

吴薛红(1969),女,硕士,副教授,注册电气工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

马刚(1984),男,博士,副教授,研究生导师,研究方向为新能源发电及入网技术、电力系统分析及故障诊断相关技术。

A configuration method of electric spring considering non-critical load access

LYU Xiao, WU Xuehong, MA Gang

(School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: In a power grid with fluctuating voltage, the electric spring transfers it to the non-critical load in the target of guaranteeing that the electricity consumption varies with the power generation, thus alleviating the tricky problem rising from an unstable new energy generation effectively. However, it is bound to bring about new security risks to the power grid if a lot of non-critical load is applied for enhancing the voltage regulation of the electric spring. At present, there are few studies on the application configuration of electric spring. This paper first explains the basic principles of electric spring and the corresponding adjustment of the line voltage in a regional power grid. Secondly, a mathematical model of application configuration for electric spring is proposed. The model illustrates the quantitative relationship between the input of non-critical load and the reactive power from the electric spring. In addition, a configuration method of electric spring as to the minimum input of non-critical load is also proposed. Finally, the study results show that the minimum-proportion of non-critical load is obtained by this method and it forms an economical and rational configuration, the correctness and effectiveness of the configuration method is verified simultaneously.

Keywords: electric spring; configuration method; voltage regulation; reactive power regulation; non-critical load

(编辑 钱悦)