

考虑非关键负载变动的电力弹簧自适应 稳压控制策略^{*}

周建萍, 邓玉君, 茅大钧, 胡成奕, 叶剑桥, 方 乐
(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

摘 要: 分布式电源在微电网中渗透率越来越高, 其间歇性对系统电压稳定性的影响不容忽视。电力弹簧(ES)作为一种新型电压控制装置, 能有效抑制关键负载(CL)两端的电压波动。为了减小负载变化对 ES 调压能力的影响, 提出一种考虑非关键负载(NCL)变动的电力弹簧自适应控制策略。介绍了 ES 的拓扑结构及限制运行条件的理论基础; 根据 $\alpha\beta$ 坐标系变化的方法检测母线电压暂降, 确定是否将 ES 投入系统; 参考电压计算模块计算出需要提供的补偿电压后, 与实际值的误差输入到 PI 控制器中, 经人工鱼群算法(AFSA)动态调整 PI 控制参数, 在保证 CL 电压稳定基础上缓解 NCL 变化对 ES 调压能力的影响。仿真结果表明: 所提控制策略能够在保证 CL 电压稳定基础上有效缓解不同工况下负载变化造成的电压不稳定问题。

关键词: 分布式电源; 电压稳定性; 自适应控制; 电力弹簧; 人工鱼群算法

中图分类号: V 242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)11-0075-07

Adaptive Voltage Stabilization Control Strategy of Electric Spring Considering Non-Critical Load Variation^{*}

ZHOU Jianping, DENG Yujun, MAO Dajun, HU Chengyi, YE Jianqiao, FANG Le
(School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The penetration rate of distributed power in the microgrid was higher and higher, and the impact of its intermittence on the stability of the system voltage could not be ignored. Electric spring (ES) was a new type of voltage control device that could effectively suppress voltage fluctuations across critical loads (CLs). In order to reduce the influence of load changes on the voltage regulation capability of ES, an adaptive control strategy of ES considering variation of non-critical load (NCL) was proposed. The topological structure of ES and the theoretical analysis of restricting operation conditions were introduced. The voltage sag was detected by the method of changing $\alpha\beta$ coordinate system to determine whether the ES was put into the system. After calculating the compensating voltage with reference voltage calculation module, the error relative to the actual value was input into the PI controller. The PI control parameters were dynamically adjusted by artificial fish swarm algorithm (AFSA) to alleviate the influence of NCL variation on the basis of ensuring the stability of CL voltage. The simulation results showed that the proposed control strategy could effectively alleviate the voltage instability caused by load changes under different operating conditions on the basis of ensuring CL voltage stability.

Key words: distributed power; voltage stability; adaptive control; electric spring; artificial fish swarm algorithm

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61275038); 上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设专项项目(19020500700)

作者简介: 周建萍(1978—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电与微电网技术。

邓玉君(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力弹簧及其在微电网能量管理中的应用等。

0 引言

微电网中间歇性分布式能源的不断渗透,引发了人们对电力系统稳定性的关注^[1]。为了充分发挥分布式发电的潜力,期望未来电网能够实现电力需求跟随发电量而变化。Hui 等^[2]提出一种新型负荷侧调节设备——电力弹簧(ES)。根据 ES 理论,电力系统中负载可以分为 2 类:(1)端电压只允许在极小范围内波动的关键负载(CL);(2)端电压允许在较大范围内波动的非关键负载(NCL)。ES 与 NCL 串联,构成依据发电量的可用性自适应地吸收或释放功率的智能负载。ES 主动改变自身功率的特性对智能电网发展具有重要意义^[3]。

随着 ES 研究的不断深入,现已实现减少储能需求、缓解功率不平衡^[4]、减少中性线电流^[5]等功能。控制方法是实现 ES 功能的核心,文献[6-7]分别针对 ES 现有控制方式易引入谐波的问题,应用时间乘以误差平方积分准则的单纯型加速算法和改进粒子群算法实时调整 PI 控制参数,但未涉及可再生能源间歇性引起的三相电压幅值不平衡问题。文献[8]利用基于数学模型的理论分析验证了 ES 能够为负载和电源提供功率/电压补偿。文献[9]针对线性负载进行了无功功率补偿的具体分析。文献[10]进一步以瞬时功率理论和数学分析了三相 ES 在不平衡三相系统中的作用,为三相 ES 的实际应用奠定理论基础。上述研究中,虽已经考虑了 PI 控制器的固定参数导致的动态响应慢等问题,但仍需要进一步优化,且传统 ES 控制方法没有考虑如热水器加热和待机模式转换等负载突然变化的情况。实际生产中大量负载同时变动时会影响 ES 的电压调节性能。

针对上述问题,本文提出了一种考虑 NCL 变动的 ES 自适应稳压控制策略,使 ES 在负载变动时具有较好的调节效果和稳定的调节性能。首先,分析了 ES 的基本原理和运行限制范围。其次,根据 $\alpha\beta$ 坐标系变化的方法检测电压暂降,确定是否将 ES 投入系统;利用人工鱼群算法(AFSA)根据 CL 实际电压值与参考值的误差计算 ES 需要提供的补偿电压,同时动态调整 PI 参数,在保证 CL 电压稳定基础上缓解负载变动对 ES 调压能力的影响。最后,基于 MATLAB/

Simulink 软件建立仿真模型,验证了所提自适应控制方法的可行性和有效性。

1 拓扑结构和限制条件

1.1 ES 拓扑结构

典型的第二代 ES 拓扑^[11]由直流电源、电压源型逆变器组成 ES 直流侧,经 LC 逆变后电容两端输出 ES 电压,ES 与 NCL 串联共同构成智能负载支路,SL 支路与 CL 支路并联作为负载侧,如图 1 所示。其中, U_{dc} 是直流侧电源电压, L 和 C 分别是低通滤波器电容和电感。

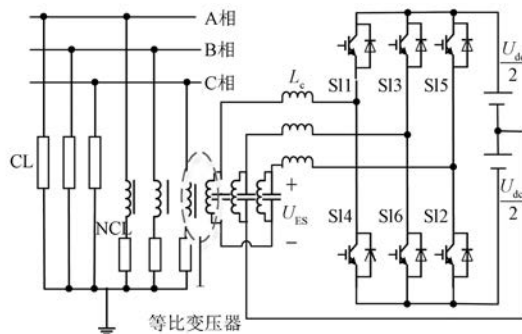


图 1 ES 典型拓扑结构

ES 的传统 PI 控制结构图^[12]如图 2 所示。其中 U_g 是系统电网侧采样电压。经锁相环(PLL)锁相后输出参考相位 θ , 直流侧电压 U_{dc} 与参考值 U_{dc_ref} 作差后通过 PI 控制与 θ 合成, 经坐标变换转到 dq 坐标系下, d 轴分量和 q 轴分量分别与 CL 电压 U_c 经坐标变换的相应分量作差运算后再通过 PI 控制器反变换到 abc 坐标系下, 产生脉宽调制(PWM)信号, 控制 ES 两端电压 U_{ES} 。

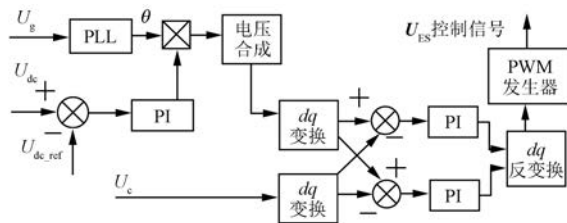


图 2 ES 传统 PI 控制结构图

1.2 限制条件的 ES 运行范围

与机械弹簧一样,ES 也只能在一定的范围内调节线路电流^[13]。由于三相 ES 本质是一个三相逆变器,其输出电压受到直流环节电压 U_{dc} 的限制。此外,虽然 NCL 可以接受宽线路电压波动,但为了

保证正常工作,仍存在最小电压限制,如额定电源电压为 110 V 的照明系统电压范围为 80~120 V。加热系统最小负载电压理论上可以是零。

取 U_s 为参考量,以 U_s 终点为圆心作半径为 U_{dc} 的圆绘制 ES 运行范围矢量图,如图 3 所示。圆弧 AD 和圆弧 BC 分别代表 U_0 的上、下限。图 3 中分别示出了线路电流和电压的矢量关系。 U_s 代表期望的 CL 电压,此时对应的电压矢量 U_0 。 U_{ES} 均不在 ES 稳定运行范围 ABCD 之内。考虑到 ES 的限制,以虚线表示补偿后的电流、电压,可以看出 ES 无法在保持 CL 电压稳定前提下达到线路电流的期望值。另外,根据图 3 可知 ES 的补偿能力与直流侧电压 U_{dc} 及 U_0 的幅值正相关。若同时放大这 2 个参数,则 U_{ES} 和 U_0 包含在 EFGH 范围内,即考虑 ES 限制条件情况时也可以将线路电流补偿到期望值。

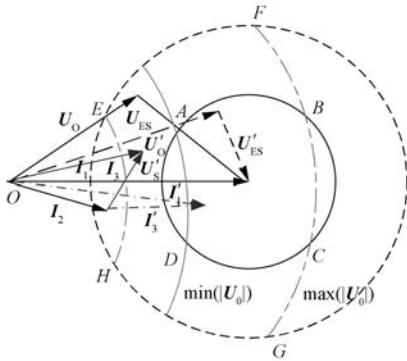


图 3 ES 运行范围矢量图

2 ES 自适应控制

2.1 电压暂降检测方法

本文利用 $\alpha\beta$ 和 dq 坐标系转换电压电流实现电压暂降的检测。电压矢量 U 分别在静止 $\alpha\beta$ 坐标系和以角速度 ω 旋转的 dq 坐标系向对应的坐标轴投影可得:

$$\begin{cases} u_\alpha = U \cos(\omega t + \varphi) \\ u_\beta = U \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_d = U \cos \varphi \\ u_q = U \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

dq 坐标系和 $\alpha\beta$ 坐标之间的变换式为

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} \quad (3)$$

经以上运算将电压矢量变换到 dq 坐标系中,

再经低通滤波器分离出 dq 电压中的直流分量 u_{d0} 、 u_{q0} ,从而得到基波电压幅值和相位跳变量:

$$\begin{cases} U = \sqrt{u_{d0}^2 + u_{q0}^2} \\ \varphi = \arctan \frac{u_{q0}}{u_{d0}} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)中基波电压幅值和相位特征量的跳变,确定系统是否发生了电压暂降,进而确定 ES 使能开关是否应该闭合。若系统发生了电压暂降,则通过闭合使能开关将 ES 接入系统,为 CL 提供补偿电压,确保两端电压稳定。电压暂降检测流程图如图 4 所示。

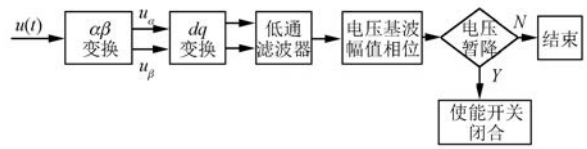


图 4 电压暂降检测流程图

ES 提供补偿电压实际是以牺牲 NCL 部分电能质量为代价。以 I_{ES} 、 U_{ES} 代表 ES 电流、电压, Z_{eq} 代表 NCL 等效阻抗,ES 的无功功率 Q 受 Z_{eq} 的影响, Z_{eq} 变化会改变 ES 输出的无功功率,计算式如下:

$$|I_{ES}| = |I_{NCL}| = \frac{|U_{NCL}|}{|Z_{eq}|} \quad (5)$$

$$Q = \frac{|U_{ES}| \cdot (|U_s| - |U_{ES}|)}{Z_{eq}} \quad (6)$$

以 220 V 系统阻性负载为例,式(6)可以改写为

$$Q = \frac{|U_{ES}| \cdot \sqrt{|U_s|^2 - |U_{ES}|^2}}{|R_{eq}|} \quad (7)$$

根据式(6)、式(7)可以看出,NCL 变动会影响 ES 的输出功率,即 ES 的电压调节能力受系统中 NCL 的影响。当系统中 NCL 大幅度增减时也可能导致母线电压振荡。因此,需要一种新的自适应电压控制策略以确保 ES 性能。

2.2 自适应 PI 控制

为了克服传统控制方法应用于 ES 非线性、强耦合系统时动态响应时间长、鲁棒性不强等缺点,本文利用 AFSA 在线整定 PI 参数,以实现 PI 自适应控制。

AFSA 通过模拟鱼类的觅食、聚群、追尾、随

机 4 种行为寻优。初始生成 N 条人工鱼, 设每条人工鱼的状态为 $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_d)$, $i = 1, 2, \dots, N$, D 是待优化参数。任意 2 条人工鱼间的距离为 $d_{i,j} = \|X_i - X_j\|$, 人工鱼感知距离 visual , 移动步长 step , 拥挤度 δ 。AFSA 的主要行为如下。

(1) 觅食行为。用 X_i 表示当前人工鱼状态, 随机在其感知范围内选择一个状态设为 X_j 。若 X_j 的状态优于 X_i , 则根据式(8)向 X_j 方向前进一步; 否则重新随机选择状态。若尝试后仍不满足, 则根据式(11)随机移动一步。

$$X_{i,\text{next}} = X_i + \text{rd}() \cdot \text{step} \cdot \frac{X_i - X_j}{\|X_i - X_j\|} \quad (8)$$

$$X_{i,\text{next}} = X_i + \text{rd}() \cdot \text{step} \quad (9)$$

其中: $\text{rd}() \in [0, 1]$ 。

(2) 聚群行为。用 X_i 表示当前人工鱼状态, n_f 表示搜索范围内人工鱼数量, X_c 表示中心位置。若经计算 $\frac{Y_c}{n_f} \geq \delta Y_i$, 其中 $Y_c = f(X_c)$, 表明该人工鱼感知范围中心食物较多且不太拥挤, 则根据式(10)向中心位置前进一步; 反之执行觅食行为。

$$X_{i,\text{next}} = X_i + \text{rd}() \cdot \text{step} \cdot \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|} \quad (10)$$

(3) 追尾行为。设目标函数值最优的人工鱼为 X_{best} 。若 $\frac{Y_j}{n_f} \geq \delta Y_i$, 则表明人工鱼 X_j 状态较优且周围不拥挤, 根据式(11)前进一步; 反之执行觅食行为。

$$X_{i,\text{next}} = X_i + \text{rd}() \cdot \text{step} \cdot \frac{X_{\text{best}} - X_i}{\|X_{\text{best}} - X_i\|} \quad (11)$$

(4) 随机行为。根据式(9)在人工鱼视野中随机选择一个状态作为 $X_{i,\text{next}}$ 。

迭代周期内计算每条人工鱼适应度函数值, 与公告板记录的最优状态比较。若当前人工鱼状态优于公告板的记录状态, 则替换公告板中的人工鱼; 否则公告板不变。迭代结束时公告板记录的人工鱼状态就是所求全局最优解^[14-15]。

分析 AFSA 的步骤可以看出, 在迭代搜索期间, 人工鱼的行为是随机的, 每次迭代的搜索次数也是随机的。这种随机性使 AFSA 具有更强的全局搜索能力, 同时拥挤因子 δ 的引入避免了局部鱼群过度拥挤, 有助于跳出局部最优解, 能最大概率的获得全局最优解。

传统 PI 控制参数通常取决于经验值, 而 PI 控制参数直接影响到系统电压的稳定性。为了兼顾稳态误差和响应时间, 本文选用积分时间绝对误差 (ITAE) 作为 AFSA 的目标函数。表达式为

$$\text{ITAE} = \int_0^{+\infty} t |e(t)| dt \quad (12)$$

在 K_p 、 K_i 可行性区间内选取一组数值作为初始参数, 然后检测 CL 参考电压与实际电压误差输入目标函数, 得到优化后的 K_p 、 K_i 。

2.3 整体控制策略

三相 ES 的控制框图如图 5 所示。取 A 相电

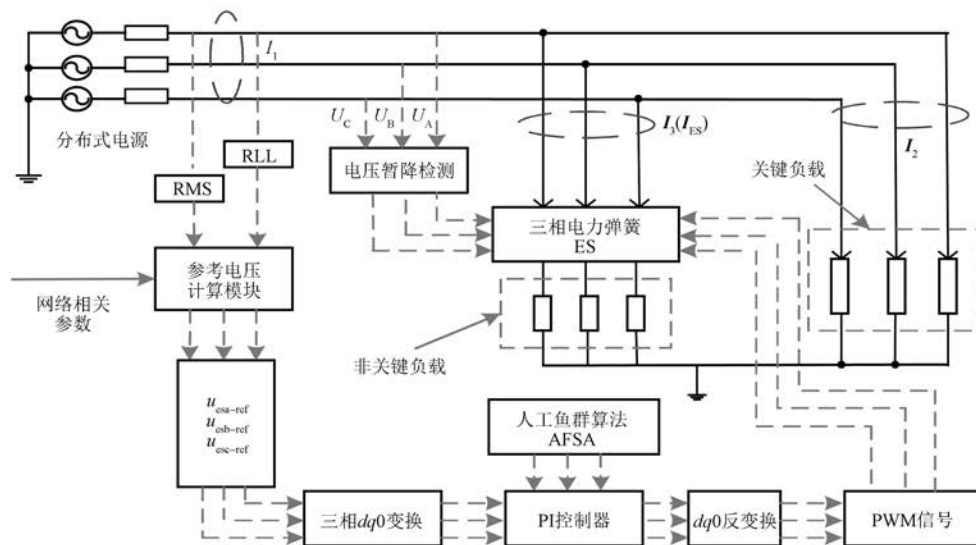


图 5 ES 整体控制框图

压作为参考量,经 PLL 有效值测量模块分别获得 A 相电压相角 θ_A 、系统频率 f 、A 相电压有效值 U_A ,则电源电压可以表示为: $\dot{U}_A = U_A \angle 0^\circ$ 、 $\dot{U}_B = U_B \angle -120^\circ$ 和 $\dot{U}_C = U_C \angle 120^\circ$ 。

电压暂降检测模块检测到电压下降之后,将 ES 投入系统中。母线电压矢量分别经有效值和 PLL 之后得到有效值和相角,与网络相关参数一起输入到 ES 参考电压计算模块,计算出的参考补偿电压 $\{u_{esa-ref}, u_{esb-ref}, u_{esc-ref}\}$,实际值和参考值分别经三相 $dq0$ 变换得到各相对应的 d 轴、 q 轴、 0 轴分量。各分量误差经 PI 控制器后再由 $dq0$ 反变换得到三相 PWM 的输入信号。3 个独立的 PWM 发生器根据各自的输入信号分别控制 ES 逆变器部分相应晶闸管的导通,动态调整 ES 提供的补偿电压。设定 PI 控制器的初始 K_p 、 K_i 分别是 13、50。当电源电压波动时,CL 电压实际值和参考值的误差也发生变化。此时以式 (12) 作为 AFSA 优化目标函数,人工鱼在可行域范围内不断优化 PI 控制参数,使得 CL 实际电压值和参考值之间的误差最小。调整 ES 的实际输出电压以稳定 CL 两端电压。

3 仿真案例

本文分布式发电单元采用传统下垂控制,为本地 CL 和 NCL 供电(考虑到 ES 用在城市配电网末端,通常电网电压等级较低,则线路阻抗取为阻性为主)。为了验证本文所提控制策略的有效性和对各类负荷的通用性,负载侧 CL 支路分为线性负载和非线性负载(以笼式异步电机为例)2 种类型,NCL 设置为阻性负载。具体参数设置如表 1 所示。

3.1 电源电压稳定工况

仿真时间为 1 s,在 ES 有效运行范围内电源电压幅值 311 V。0~0.3 s 内 NCL 保持 60 Ω ,假设 0.3、0.5 s 时 NCL 突然发生变化,相继并入 45 Ω 阻性负载。CL、NCL、ES 电压如图 6、图 7、图 8 所示。

从图 6 可以看出,CL 两端电压基本不变,仅在 0.3、0.5 s NCL 切换时有少许波动,且波动幅值小于 1 V。另外因为线路阻抗的存在,所以 CL 两端电压最终稳定在 307 V。

表 1 仿真参数设置

参数名称	设定值
DG 单元直流侧/V	700
DG 单元线路阻抗 Z_1	0.8 Ω +1 mH
有功-频率下垂系数	2×10^{-4}
无功-电压下垂系数	1×10^{-5}
大电网电压/V	311
系统频率/Hz	50
大电网线路阻抗 Z_0	0.642 Ω +0.264 mH
CL 线性负载(阻感)	10 kW+1 kvar
CL 非线性负载 (电机负载)	负载转矩 30 N·m 额定功率 4 400 VA
	NCL1 60 Ω
NCL 线性负载	NCL2 45 Ω NCL3 45 Ω
低通滤波器	$L=3$ mH, $C=50$ μ F

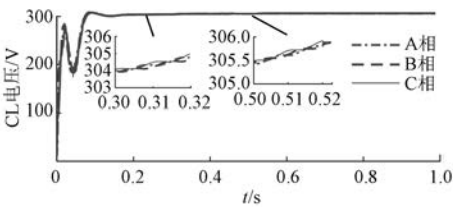


图 6 电源电压稳定工况下 CL 电压

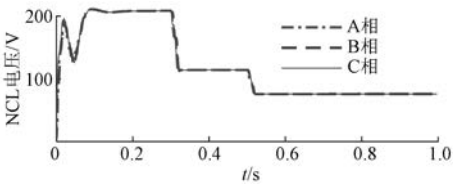


图 7 电源电压稳定工况下 NCL 电压

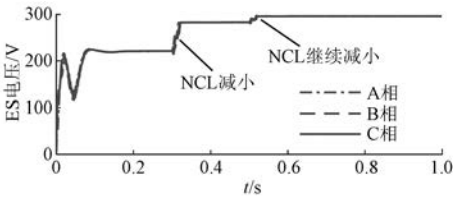


图 8 电源电压稳定工况下 ES 电压图

从图 7 可以看到,0.3、0.5 s NCL 减小,NCL 两端电压随之减小;而图 8 中 ES 电压相应增加,ES 与 NCL 串联保证 CL 两端电压稳定,且 NCL 增减对 CL 电压几乎无影响。

3.2 电网电压不平衡工况

仿真时间 1、0.1 s 时出现电压不平衡。假设 A 相电压维持在 220 V 不变, B 相电压升高 5%, 即 230 V, C 相电压降低 5%, 即 210 V。NCL 设置同第 3.1 节。从图 9 可以看出, 在电源电压幅值不平衡条件下, 经 ES 调整 CL 两端电压最终稳定在 307 V 左右, 0.3 s 时因 NCL 变化导致 CL 电压略有波动。三相电压最大误差约为 0.2 V, 明显低于电源电压不平衡程度。

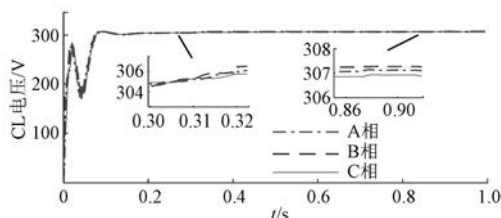


图 9 电压不平衡工况下 CL 电压图

对比图 9、图 10 可以看出, NCL 两端电压波动幅值明显高于 CL 两端电压, 即电源电压的能量波动由 ES 转移到了宽电压范围的 NCL 上。为了实现 ES 保证 CL 电压稳定这一首要目标, 图 11 中 ES 调整自身电压做出相应补偿。

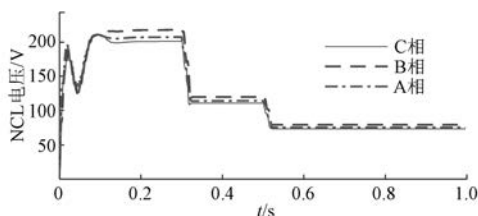


图 10 电压不平衡工况下 NCL 电压图

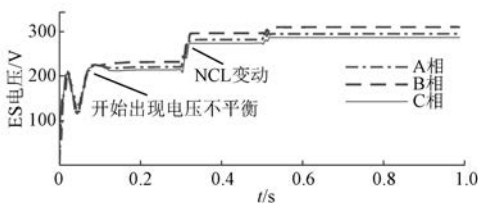


图 11 电压不平衡工况下 ES 电压图

当电机型非线性负载作为 CL, 电机参数为负载转矩 15 N·m, 理想空载转速 1 500 r/min, 仿真时间为仍为 1 s, NCL 参数设置不变。

电机的起动稳定过程如图 12 所示。电机转速维持在 1 470 r/min, 转差率稳定在 0.05 附近, 电机转矩为 16.2 N·m, 电机稳态运行。NCL 的变

化对电机负载的运行基本无影响。

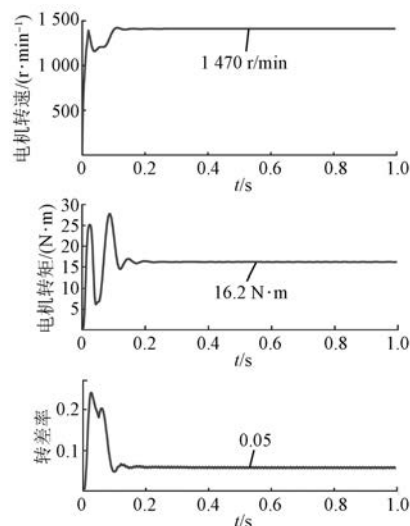


图 12 电机负载运行参数

从仿真结果可以看出: 本文所提控制策略有效提高了 ES 调压能力, 减小了 CL 两端实际电压和参考电压的误差, 能够缓解 NCL 变化对 ES 调压能力的影响。

4 结 语

ES 作为一种输入电压控制型的电子设备, 可以有效抑制分布式电源引起的母线电压波动问题。针对传统 PI 控制动态响应时间长及 NCL 增减对 ES 调压能力的影响问题, 本文在分析 ES 运行范围基础上, 根据 $\alpha\beta$ 坐标变换法检测线路电压暂降, 确定 ES 是否运行。利用 AFSA 以绝对时间积分误差作为目标函数动态优化 PI 控制参数。通过控制器动态调节 ES 输出补偿电压, 稳定 CL 两端电压, 有效解决了 NCL 变化引起的电压不稳定问题。即使分布式发电出现三相电压不平衡情况, 通过该控制策略的 ES 同样可以保证 CL 电压稳定, 有效缓解了间歇性发电给系统电压稳定性造成的负面影响。

【参考文献】

- [1] 张勇军, 刘斯亮, 江金群, 等. 低压智能配电网技术研究综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 1.
- [2] 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.
- [3] 周建萍, 李欣煜, 茅大钧. 基于改进 PSO 算法的非

- 理想电压条件下电力弹簧控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(22): 165.
- [4] CHEN X, HOU Y, TAN S C. Mitigating voltage and frequency fluctuation in microgrids using electric springs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 508.
- [5] 尹发根,王淳,王巍璋.计及系统线路阻抗的电力弹簧电压电流同时补偿控制策略[J/OL].电网技术, 2019. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0041>.
- [6] 吴捷,王宝华.基于最优比例积分的电力弹簧控制器设计[J].新能源发电控制技术,2017,39(4): 39.
- [7] MA G, XU G, CHEN Y, et al. Voltage stability control method of electric springs based on adaptive PI controller [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 95: 202.
- [8] 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.
- [9] SONI J, SEN B, KANAKESH V K, et al. Performance analysis and evaluation of reactive power compensating electric spring with linear loads [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 101: 116.
- [10] YAN S, WANG M H, YANG T B, et al. Achieving multiple functions of 3-phase electric springs in unbalanced 3-phase power systems using the instantaneous power theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5784.
- [11] 王青松.电力弹簧若干关键技术研究[D].南京:东南大学,2016.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 吴长元,吴杰康,翁子豪,等.新能源配电网多类型有功无功电源容量协同优化[J].广东电力, 2018, 31(3): 98.
- [15] ZHENG Z, LI J, DUAN P. Optimal chiller loading by improved artificial fish swarm algorithm for energy saving [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2018, 155: 227.

收稿日期: 2019-08-26

(上接第 29 页)

【参考文献】

- [1] 张勇,程小华.无刷直流电机与永磁同步电机的比较研究[J].微电机,2014,47(4): 86.
- [2] 韩伟.不同驱动方式下的无刷直流电机性能比较[J].城市轨道交通研究,2017,20(2): 38.
- [3] 王高林,杨荣峰,于泳,等.内置式永磁同步电机转子初始位置估计方法[J].电机与控制学报,2010, 14(6): 56.
- [4] 金光哲,徐殿国,高强,等.高频注入电压预估同步电机转子位置检测方法[J].中国电机工程学报, 2014, 34(9): 1376.
- [5] 张新荣,张理伟,刘红平,等.无刷直流电机基于线间反电动势的转子位置估计[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(1): 105.
- [6] 王欣,梁辉,秦斌.基于 OSELM 的无刷直流电机无位置传感器控制[J].电机与控制学报,2018,22(11): 82.
- [7] ZHANG X, ZHANG W. An improved rotor position estimation in PMSM with low-resolution Hall-effect sensors[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou, 2014.
- [8] 刘丙友,竺长安,郭兴众,等.基于改进型 ADRC 的永磁同步电机转子位置角控制方法[J].电机与控制学报,2017,21(12): 24.
- [9] LIU Y, ZHAO J, XIA M, et al. Model reference adaptive control-based speed control of brushless DC motors with low-resolution Hall-effect sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1514.
- [10] 张洪帅,王平,韩邦成.基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J].中国电机工程学报,2014,34(12): 1889.
- [11] 倪启南,杨明,徐殿国,等.低分辨率位置传感器永磁同步电机精确位置估计方法综述[J].电工技术学报,2017,32(22): 70.

收稿日期: 2019-08-03