

基于神经元自适应控制的动态电压恢复器研究

刘震宇

(国网冀北电力有限公司承德供电公司, 河北 承德 067000)

摘要: 针对微电网并网系统中存在的电压跌落电能质量问题, 研究了一种基于神经元自适应控制的蓄电池储能动态电压恢复器(DVR)。主要由蓄电池、逆变器、LC 滤波器、变压器 4 个部分组成。其中, 为了提升该 DVR 的控制性能, 引入神经元自适应控制算法改进了外环电压 PI 调节器, 实现了外环控制参数的自适应调节, 从而得到新的双闭环控制策略。然后, 结合空间电压矢量调制法最终实现控制。最后, 在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建了基于神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR 的并网系统模型。试验结果表明, 采用神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR 能够补偿微电网的电压跌落, 具有较强的动态响应能力和抗扰能力。

关键词: 动态电压恢复器; 微电网; 神经元自适应控制; 电压跌落

中图分类号: TM 714.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)07-0053-05

doi: 10.12177/emca.2020.041

Research on Dynamic Voltage Restorer Based on Neuron Adaptive Control

LIU Zhenyu

(Chengde Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067000, China)

Abstract: Aiming at the power quality problem of voltage drop in the microgrid grid-connected system, a battery energy storage dynamic voltage restorer (DVR) based on neuron adaptive control is studied. It is mainly composed of battery, inverter, LC filter and transformer. In order to improve the control performance of the DVR, the neuron adaptive control algorithm is introduced to improve the outer loop voltage PI regulator, and the adaptive adjustment of the outer loop control parameters is realized, thereby obtaining a new double-closed-loop control strategy. Then, combined with the space voltage vector modulation method, the control strategy is achieved. Finally, a grid-connected system model of battery energy storage DVR based on neuron adaptive control is built in MATLAB/Simulink simulation software. Simulation results show that the battery energy storage DVR based on neuron adaptive control can compensate for the voltage drop of the microgrid. It has strong dynamic response capability and anti-interference ability.

Key words: dynamic voltage restorer (DVR); microgrid; neuron adaptive control; voltage drop

0 引言

微电网因具有便捷、高效、自治性等特点, 提高了风能、太阳能等清洁能源的并网容量, 进一步提高了微电网中清洁能源的利用率, 已经成为电力领域的研究热点之一^[1-5]。由清洁能源构成的微电网系统是一个自我控制、保护和管理的自治系统, 但是风能、太阳能等清洁能源并网

时由于具有不可预测性与较大随机波动性等问题, 带来并网后电压跌落以及电压波动等电能质量问题^[6-9]。针对上述问题, 带有储能装置的动态电压恢复器(DVR)由于其结构简单、性能优良等优点, 已经广泛应用于微电网并网系统中进行跌落电压的补偿, 从而提升了电能质量^[10-12]。

蓄电池储能的控制及应用目前已经十分成熟, 将其作为储能装置应用于微电网中, 能够有效

收稿日期: 2020-03-11; 收到修改稿日期: 2020-04-22

作者简介: 刘震宇(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化控制、继电保护、电网运行等。

解决电压跌落等电能质量问题^[13-14]。本文提出了一种基于神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR, 考虑到 DVR 常用的双闭环控制策略中的抗负荷扰动能力差以及响应速度慢等缺点^[4], 在其外环电压 PI 调节器中引入神经元自适应算法改进了调节器, 实现了外环控制参数自适应调节, 最后结合空间矢量脉冲宽度调制 (SVPWM) 技术达到了提高清洁能源并网电能质量的目的。

1 基于神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR

基于神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR 的并网系统结构示意图如图 1 所示。主要由蓄电池、逆变器、LC 滤波器、变压器 4 个部分组成。其中, 蓄电池作为储能装置, 构成 DVR 的核心, 其储存的能量对微电网中电压跌落进行电压补偿; 逆变器一端与蓄电池储能装置相连, 另一端经 LC 滤波器以及变压器与交流电网相连, 通过对逆变器进行控制从而实现了 DVR 的输出控制; LC 滤波器用于滤除高次谐波; 变压器用于电压等级转换与电气隔离。

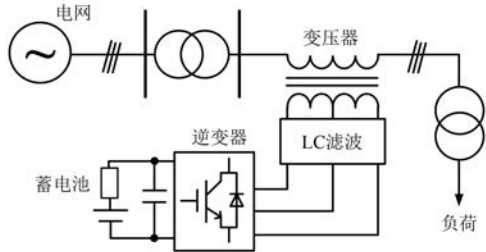


图 1 基于蓄电池储能 DVR 的并网系统结构示意图

2 基于神经元自适应控制的双闭环控制策略分析

本文在传统双闭环控制基础上对外环电压 PI 调节器引入神经元自适应控制算法进行改进, 然后结合 SVPWM 得到基于蓄电池储能的 DVR 双闭环控制策略, 如图 2 所示。

为了能够抑制或补偿扰动等因素对系统的影响, 本文提出采用神经元自适应 PI 算法, 具体是根据电网电压波动实时调节控制器系数, 提高系统对新能源随机波动的抗扰动性能。

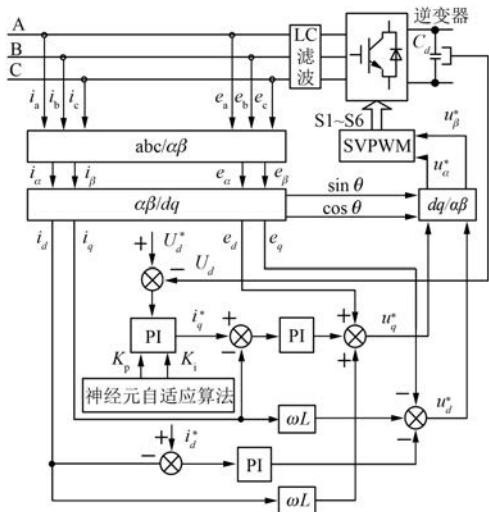


图 2 基于神经元自适应控制的双闭环控制结构

图 3 所示为引入神经元自适应算法的外环 PI 调节器示意图。

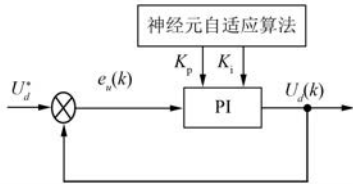


图 3 引入神经元自适应算法的外环 PI 调节器示意图

从图 3 可以看出, 引入神经元自适应算法改进传统外环电压 PI 调节器后, 外环电压 PI 调节器的控制参数将由电压输入得到电压偏差值 e , 然后通过神经元自适应算法自动调节^[15]。

实际中关于 PI 控制参数算法的选定并没有一个普遍适应的参考依据, 为了简化, 提高整个算法的计算速度, 本文采用离散型 PI 控制器算法。离散型 PI 控制器算法是一种经典的控制算法, 结合神经元自适应算法和离散型 PI 控制器得到神经元自适应离散 PI 控制器。改进外环电压 PI 调节器后的对应控制参数关系如表 1 所示。

表 1 中, 考虑到内外环 PI 控制器参考固定的比例、积分参数不能很好地适应系统动态变化, 存在抗负荷扰动能力差以及响应速度慢等缺点^[4], 本文对关键的电压外环比例、积分控制参数进行自适应调节优化。其中, 提出的神经元自适应 PI 控制器输入量即为 DVR 需要控制的电压给定值 U_d^* , 经过 PI 参数的自适应调节, 外环电压 PI 控

表 1 改进后的对应控制参数关系

神经元自适应 PI 控制器控制量	改进后控制参数
参考输入 $r(k)$	参考电压 U_d^*
系统输出 $y(k)$	实际电压 $U_d(k)$
控制量 $u(k)$	内环参考电流 i_q^*
系统误差 $e(k)$	电压误差 $e_u(k)$

制器的比例、积分参数能够根据 DVR 检测到的电压误差优化调整,进而得到更为准确的内环电流给定参考值,从而实现对实际电压的良好控制。

神经元离散 PI 控制器的表达式为

$$\Delta u(k) = w_1 x_1 + w_2 x_2 \quad (1)$$

式中: x_1 、 x_2 分别为比例、积分对应状态变量。

采用离散 PI 控制器则 x_1 、 x_2 表达式分别为

$$x_1(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

$$x_2(k) = e(k) \quad (3)$$

式中: w_1 、 w_2 分别为 x_1 、 x_2 对应的权值,其值由神经网络学习训练自动调节,即达到自适应调节。

选取指标函数为

$$J(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (4)$$

其中, $J(k)$ 使得权值沿着负梯度方向变化,从而实现误差 $e(k)$ 的绝对值减小,即达到控制目标输出有效跟踪参考给定输入值。

$J(k)$ 与权值变化量 $\Delta w_i(k)$ 的关系为

$$\begin{aligned} \Delta w_i(k) &= -\eta_i \left[\frac{\partial J}{\partial w_i(k)} \right] = \\ &= -\eta_i \left[\frac{\partial J}{\partial y(k)} \right] \left[\frac{\partial y}{\partial w_i(k)} \right] = \\ &= \eta_i e(k) \left[\frac{\partial y}{\partial \Delta u(k)} \right] \left[\frac{\partial \Delta u(k)}{\partial \Delta w_i(k)} \right] \quad (5) \end{aligned}$$

式中: η_i ($i=1,2$) 为 PI 控制器比例、积分学习率,且满足 $0 < \eta_i < 1$ 。

神经网络采用 hebb 学习算法,则式(5)可改写为

$$\Delta w_i(k) = \eta_i e(k) x_i(k) \left[\frac{\partial y}{\partial \Delta u(k)} \right] \quad (6)$$

考虑到实际中 $\partial y / \partial \Delta u(k)$ 很难精确确定,一般通过符号函数 $\text{sgn}[\partial y / \partial \Delta u(k)]$ 取其近似值,近似误差则通过学习率 η_i 补偿。

引入比例系数 K 来简化学习率 η_i 的选取,则式(6)可改写为

$$\Delta u(k) = K \sum_{i=1}^2 w_i^0(k) x_i(k), K > 0 \quad (7)$$

式中: $w_i^0(k)$ 表示归一化处理后的权值。

$$w_i^0(k) = w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, $Kw_i^0(k)$ 、 $Kw_2^0(k)$ 相当于神经元离散 PI 控制器的 K_p 、 K_i ,同时随着 $w_i^0(k)$ 变化实现自适应调节功能。

综上所述,本文提出的神经元自适应算法改进外环 PI 调节器控制参数实现过程如下:

(1) 随机选择 PI 控制器比例、积分对应状态变量权值的初始值,且 $-1 < w_1 < 0$ 、 $-1 < w_2 < 0$,选取适当的学习率 η_i 和 η_2 以及比例系数 K 。

(2) 根据参考电压 U_d^* 和实际电压 $U_d(k)$,计算电压误差 $e_u(k)$ 。

(3) 根据式(7)计算电压的变化量 $\Delta u(k)$,然后计算出电网控制输出量。

(4) 权值 w_1 、 w_2 根据式(5)开始自适应调节,从而根据式(8)确定 $Kw_1^0(k)$ 、 $Kw_2^0(k)$ 。

(5) 令 $k=k+1$,并返回步骤(2),继续调节控制参数。

为了验证神经元自适应算法改进外环电压 PI 调节器控制参数的稳定性,采用 Lyapunov 第二法进行理论证明^[16],选取的 Lyapunov 函数为

$$V(k) = J(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (9)$$

其中,当 $e(k)=0$ 时, $V(k)=0$; 当 $e(k) \neq 0$, $V(k)>0$,由此, $V(k)$ 为正定函数,满足 Lyapunov 稳定条件。

$V(k)$ 的变化量函数 $\Delta V(k)$ 为

$$\Delta V(k) = \frac{1}{2} [e^2(k+1) - e^2(k)] \quad (10)$$

式(10)中,误差变化量 $\Delta e(k)$ 是根据权值变化自动调节的,代入式(5),推导得:

$$\Delta e(k) = -e(k) \mathbf{p}' \boldsymbol{\eta} \mathbf{p} \quad (11)$$

式(11)中, $\boldsymbol{\eta}$ 为二阶对角矩阵, $\mathbf{p}$ 为 2×1 阶向量,表达式分别为

$$\boldsymbol{\eta} = \text{diag}[\eta_1 \quad \eta_2] \quad (12)$$

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial e}{\partial w_1} & \frac{\partial e}{\partial w_2} \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

为了判断变化量函数 $\Delta V(k)$ 的正定性,将式(10)代入式(11)并展开化简得:

$$\Delta V(k) = \frac{1}{2} (\mathbf{e} \mathbf{p})^T \mathbf{C} (\mathbf{e} \mathbf{p}) \quad (14)$$

式中: $\mathbf{C}$ 为 2×2 阶实对称矩阵,并满足 $\mathbf{C} = 2\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta} \mathbf{p} \mathbf{p}' \boldsymbol{\eta}$ 。

为了满足系统稳定性要求,变化量函数

$\Delta V(k)$ 必须为负定的, 则矩阵 C 必须为正定的。将矩阵 C 展开得到其必须满足正定的充分条件为

$$\begin{cases} \eta_1 p_1^2 < 2 \\ \eta_1 p_1^2 + \eta_2 p_2^2 < 2 \end{cases} \quad (15)$$

将式(13)代入式(15)得到矩阵 C 满足正定的等价充分条件为

$$\eta_1 \left(\frac{\partial e}{\partial w_1} \right)^2 + \eta_2 \left(\frac{\partial e}{\partial w_2} \right)^2 < 2 \quad (16)$$

综上可得, 学习率 $\eta_i (i=1, 2)$ 只需要选取合适的值, 使式(16)成立, 函数 $\Delta V(k)$ 即满足负定条件, 系统满足 Lyapunov 稳定性条件的要求。

3 仿真试验分析

在 MATLAB/Simulink 软件中搭建基于神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR 的并网系统模型, 并采用图 2 中的控制策略, 在 MATLAB/Simulink 仿真软件环境中对整个系统进行建模分析。

运行仿真模型, 在 0.70 s 设置电压跌落, 0.90 s 结束, 结果分别如图 4~图 8 所示。

图 4 和图 5 分别为电压跌落 15% 的电压波形以及跌落 15% 并带阻性负载时的电压波形。图 4 中从 0.70 s 开始跌落, 没有采用补偿, 直到 0.90 s 电网电压一直低于正常值。从图 5 可以看出, 当采用补偿时, 0.70 s 跌落后 DVR 迅速检测到电压跌落便输出自身储能进行补偿, 将原本即将跌落的电压进行抬升, 电压恢复响应时间约为 0.01 s, 0.90 s 电压不再跌落, DVR 退出补偿。对比图 4 和图 5 可以看出, 电压补偿效果良好, 响应速度快, 带阻性负载运行时仍然能够保持良好的电压补偿能力, DVR 对电网电压的恢复能力强。

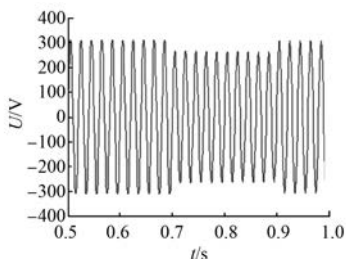


图 4 电网电压跌落 15% 的波形

为了进一步验证 DVR 补偿电压跌落的有效性, 将电压跌落由 15% 增大为 30%。图 6 和图 7

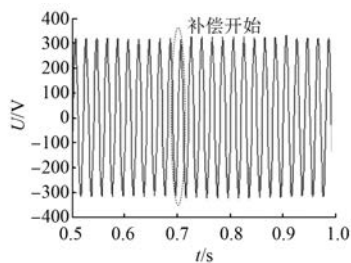


图 5 电网电压跌落 15% 带阻性负载时的波形

分别为电压跌落 30% 的电压波形以及跌落 30% 并带阻性负载时的电压波形。图 6 中, 从 0.70 s 开始电压跌落, 跌落程度增加, 没有采用补偿, 直到 0.90 s 电网电压一直低于正常值。从图 7 可以看出, 当采用补偿后, 0.70 s 电压跌落现象一出现, DVR 仍然能够迅速检测到变化并输出自身储能进行补偿, 将原本即将跌落的电压进行抬升, 电压恢复响应时间仍然小于 0.01 s, 0.90 s 电压不再跌落, DVR 退出补偿。

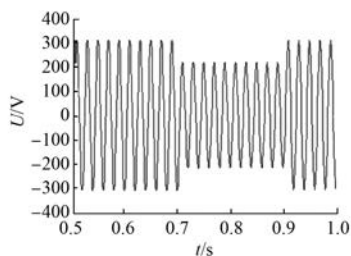


图 6 电网电压跌落 30% 的波形

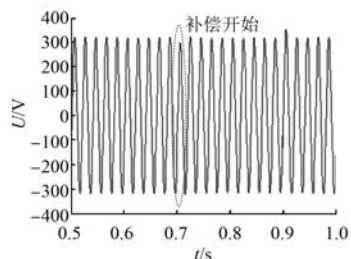


图 7 电网电压跌落 30% 带阻性负载时的波形

从仿真结果可以看出, 当电压跌落 15% 时, 基于蓄电池储能的 DVR 能够在电压跌落时间段快速响应, 输出自身储能进行补偿, 补偿响应时间约为 0.01 s, 电压波形几乎不受影响, 具有很好的正弦度。当电网电压跌落 30% 时, 基于蓄电池储能的 DVR 同样能够在电压跌落时间段补偿电压, 并且此时的补偿响应时间小于 0.01 s。综上可

知,基于蓄电池储能的 DVR 具有较快的响应速度、抗扰动性能以及较好的控制性能。

如图 8 所示,从 w_1 、 w_2 权值变化情况可以看出,神经元自适应算法达到了实时调节外环电压 PI 调节器的控制系数的效果,提升了并网电能质量。

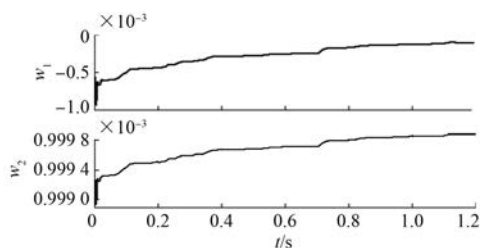


图 8 w_1 、 w_2 权值

4 结 语

针对风能、太阳能等清洁能源并网系统中存在电压跌落的电能质量问题,本文提出采用一种基于神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR,通过引入神经元自适应控制算法对传统双闭环控制的外环电压 PI 调节器进行改进,从而达到外环电压 PI 调节器的比例参数和积分参数的自适应调节,提升了的控制性能。在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建了整个系统模型并进行仿真试验验证。结果表明,本文提出的基于神经元自适应控制的蓄电池储能 DVR 能够补偿并网系统中的电压跌落,并且具有较快的响应速度和较高的控制性能。

【参 考 文 献】

- [1] 张运洲,黄碧斌. 中国新能源发展成本分析和政策建议[J]. 中国电力,2018,51(1): 10.
- [2] 袁晓,赵敏荣,胡希杰,等. 太阳能光伏发电并网技术的应用[J]. 上海电力,2006(4): 342.
- [3] 毛伙南,陈峰,崔传芹,等. 小型光伏并网发电系统设计与应用[J]. 机电工程技术,2011,40(12): 46.
- [4] 李越嘉,杨莹,常国祥. 微电网技术在中国的研究应用现状和前景展望[J]. 中国电力,2016,49(增刊1): 154.
- [5] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1821.
- [6] 赵洪山,程亮亮. 基于双线性观测器的双馈风电机组变流器功率管开路故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 72.
- [7] 欧阳金鑫,唐挺,郑迪,等. 低电压穿越控制下双馈风电机组短路电流特性与计算方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 216.
- [8] HE J, LIANG B, LI Y W, et al. Simultaneous microgrid voltage and current harmonics compensation using coordinated control of dual-interfacing converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2647.
- [9] 陈亚爱,刘劲东,周京华. 太阳能并网逆变器故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3405.
- [10] 周晖,齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23.
- [11] 杜先君. 动态电压恢复器的电压凹陷检测与补偿控制策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- [12] VILATHGAMUWA D M, PERERA A A D R, CHOI S S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 928.
- [13] WU Y, NIE Z, ZHU J. A single-phase 400 Hz dynamic voltage restorer with PR control [C]//IEEE IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013.
- [14] 陈国栋. 动态电压恢复器电压跌落检测算法与控制技术综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(5): 20.
- [15] 赵锡龄,焦云婷. 单神经元自适应控制 PSD 在再热汽温控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 93.
- [16] 于长官. 现代控制理论及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.