

适用于微电网的集中式DVR拓扑研究

动态电压补偿器 (Dynamic Voltage Restorer, DVR) 是近年来使用最多的维持微电网敏感负荷电能质量的元件, 但传统单个动态电压补偿器应对电压跌落时具有应用率低、运行经济性差和补偿时间短等缺点; 而改进型馈线间动态电压补偿器 (The Interline Dynamic Voltage Restores, IDVR) 存在两条馈线不能同时发生跌落的局限性。提出一种集中式动态电压补偿器的拓扑结构, 针对单一馈线电压跌落的情况, 提高了补偿效果与补偿时间; 针对多馈线同时跌落的情况, 该结构可对多个敏感负荷同时补偿, 并对重要元件优先补偿。仿真结果表明, 该结构可提高动态电压补偿器的应用率, 增强直流储能设备经济性, 以及更好的补偿效果。

张宇鑫 侯 梁 李博森/国网陕西省电力公司培训中心

0 引言

微电网是集合分布式发电、负荷、控制系统以及储能装置的独立供电系统。分布式发电投用到供电系统中可以更好地应对日渐严峻的化石能源挑战, 在减少污染、提高效率方面有着广阔的前景。提高供电灵活性, 已经成为当今世界解决用电问题的大趋势。相比于大电网集中式供电, 微电网具有就地供给的特点。在替代化石能源, 保护环境的同时节省输电、变电的成本投入, 显著降低了集中输电的线路损耗。但另一方面, 由于微电网分布式电源的复杂性和多样性, 电压突变等电能质量问题对微电网中敏感负荷的影响不容忽视。

动态电压补偿器 (Dynamic Voltage Restorer, DVR) 是针对中低配电网电压暂降问题最为经济有效的电力装置。一个完整的DVR结构包含储能单元、逆变单元、滤波单元和控制器四个主要部

分, 串联在敏感负荷的线路前。常规DVR的储能单元由于容量大小与经济性的相悖关系, 俨然已经成为DVR的研究热点之一^[1]。在储能装置的研制方面, 文献[2]和文献[3]提出了采用超级电容器和飞轮储能来替换传统储能的方法; 也有采用光伏发电^[4]并运用模糊控制^[5]对储能进行替换, 但光伏发电的随机局限性影响了DVR的电压补偿性能; 利用分布式电源^[6-7]配合的混合型储能^[8]方式也是比较常见的改进方式; 文献[9]提出将两个DVR结构串联接在敏感元件前配合工作, 以补偿敏感元件的电压跌落; 文献[10]讨论了串并联的协调补偿策略。以上几种改进方式, 讨论了在不同储能单元的情况下, DVR的工作状态, 但在单一馈线处于正常运行工作状态下, 其DVR结构均工作于备用状态, 利用率低。

馈线间动态电压补偿器^[11] (The Interline Dynamic Voltage Restorer, IDVR) 的提出^[12]有效地解决了常规DVR造价高、应用率低^[13]的缺点, 并且易于封装和模块化, 但是馈线间DVR无法应对多馈线同时发生电压跌落的情况, 比如微电网孤岛转换便是该种情况之一。

本文以包含多个分布式电源的微电网为背景, 提出了一种集中式动态电压补偿器的拓扑结构; 然后分别分析了单一馈线跌落情况下的检测与补偿控制以及多馈线同时跌落情况下的运行策略。最后通过Matlab/Simulink仿真软件对其有效性进行了对比验证。



张宇鑫/硕士研究生

关键词/Keywords

微电网 ·
电压跌落 ·
动态电压补偿器 ·
集中控制 ·
拓扑 ·

1 集中式DVR的拓扑结构分析

以具有 n 条馈线的微电网为例，集中式DVR的结构图如图1所示。馈线1，馈线2， $\dots$ ，馈线 n 分别为微电网中连接不同分布式电源的线路，且各条馈线上均接有一个敏感负荷。

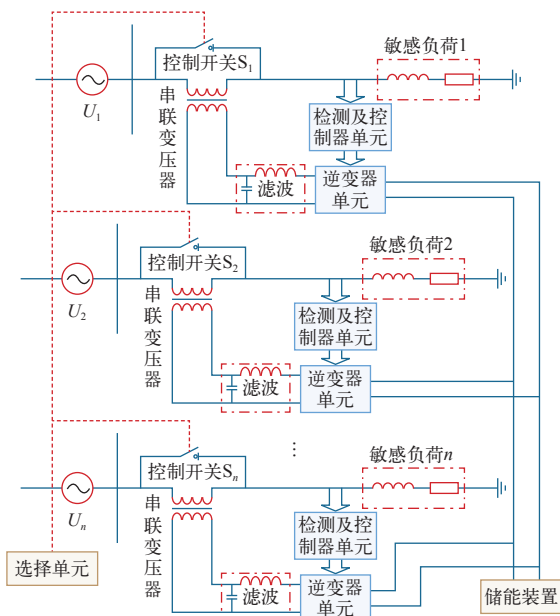


图1 集中式DVR结构

集中式DVR系统包含分别串联在各个敏感元件前的串联变压器、滤波器、脉冲宽度调制逆变单元、各个馈线共用的储能装置、检测电压情况并对逆变器进行调节的检测及控制器单元、对馈线进行选择补偿的选择单元以及控制开关 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。图1中， $U_1, U_2, \dots, U_n$ 为微网中各条馈线的等效电源电压。针对不同的电压跌落情况，即单一馈线跌落或多馈线同时跌落的情况，通过控制这些控制开关的逻辑信号，可以实现单一馈线的电压补偿或多馈线的选择电压补偿。

当微电网正常运行，经检测单元检测，各条馈线均未发生电压跌落时，控制器发出指令，命令各个控制开关 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 均处于闭合状态，集中

式DVR处于旁路状态。

当某一馈线发生电压跌落时，经过检测及控制单元，使得该线路上的控制开关打开，将DVR结构串接在线路中。这时，储能单元向发生跌落的线路中串联的DVR结构供给能量，补偿该线路敏感元件的电压。单一线路电压跌落的工作原理类似常规DVR，但优势也显而易见：一方面，由于其设计储能容量大于常规DVR，因此补偿效果较常规DVR好很多；另一方面，任何一条馈线发生跌落，集中式DVR都会起动进行补偿，应用率大大提高。

当某两条或多条馈线电压同时发生跌落，根据现场实际的情况不同，集中式DVR可以同时多条馈线进行补偿，并且对于包含重要敏感负荷的线路进行优先补偿。

集中式DVR相较于馈线间DVR，对敏感元件进行电压补偿是从储能装置到线路，而不是从正常线路到待补偿线路，因而对于其他线路的电压情况不会有所影响。

2 集中式DVR工作原理分析

2.1 单馈线电压跌落

2.1.1 检测方法

目前常用的检测方法有基波分量法、有效值算法、缺损电压法、小波变换法以及 dq 分解法，本文采用准确度和实时度都比较好的 dq 分解法。

a、b、c三相电压变换为 d 、 q 轴的关系式表达如下

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， u_d 为 d 轴的电压分量； u_q 为 q 轴的电压分量。

解出

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} -\cos(\omega t + \varphi_1) & -\cos(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_1) & -\cos(\omega t + 2\pi/3 + \varphi_1) \\ -\sin(\omega t + \varphi_1) & \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi_1) & \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi_1) \end{pmatrix} \quad (2)$$

矩阵 C 中的 $\sin(\omega t + \varphi_1)$ 、 $\cos(\omega t + \varphi_1)$ 是与a相正序基波电压同相位的正余弦信号。通过式(1)

和式(2)分别计算出电压分量 u_d 和 u_q 。则三相电压的幅值 v 与跳变相位 u_d 、 u_q 的关系如下

$$v = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan \frac{u_q}{u_d} \quad (4)$$

2.1.2 控制方式

DVR的主要控制方式有前馈控制与反馈控制。前馈控制通过比较参考电压与系统电压的差值来计算出需要补偿的电压，这也是最简单、最直接的控制方式。反馈控制是通过比较负荷前的实际电压与所设定参考电压的差值，进而计算出所需补偿电压的值，以达到敏感负荷前的电压稳定。本文将采用反馈控制的方式如图2所示。

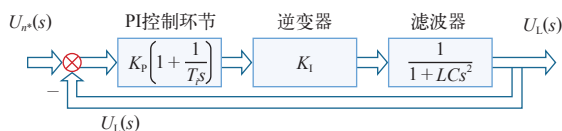


图2 控制框图

传递函数为

$$F(s) = \frac{K_p K_i (1 + T_i s)}{T_i s (1 + LCs^2) + K_p K_i (1 + T_i s)} \quad (5)$$

本文采取反馈控制具体的工作过程为：先将采集到的电压值进行abc-dq变换，得到当前电压值的d轴q轴分量；其次将期望的负载参考量与当前电压的d、q分量值相减得到需要补偿的值；然后通过PI控制器进行调整并进行dq-abc变换产生电压调制波信号，随后进一步产生PWM脉冲信号触发逆变桥，输出电压经过滤波环节和耦合变压器后成为补偿电压注入系统，完成对负载电压的补偿。

2.2 多条馈线电压跌落的情况

2.2.1 补偿策略选择

常用补偿策略有完全补偿法、同向补偿法以及最小能量补偿法。

完全补偿法要求DVR补偿后的电压与补偿前的完全一致，补偿效果最好，但需求能量最多，对储能元件容量要求最大。同向补偿法设定补偿后的电压幅值与补偿前保持一致，但对于相位跳变不予以补偿。最小能量补偿法则是在考虑最小能量消耗的情况下进行最大效果的补偿，在现有

的研究中其补偿深度在同等储能容量下最大，但补偿效果均不如完全补偿法。

本文提出的集中式动态电压补偿器的储能元件具有使用率高、容量大以及优先补偿重要元件的特点。综合考虑集中式DVR的优势与各个补偿策略的优缺点，本文的补偿策略选用完全补偿法。

如图3所示， V_{ref} 为负荷未发生电压暂降时的电压相位； V_L 为负荷发生暂降后的电压相位，且 V_L 的幅值为 V_{ref} 的K倍，即 $V_L = KV_{ref}$ ； α 为负载功率因数角； β 为相位跳变角。

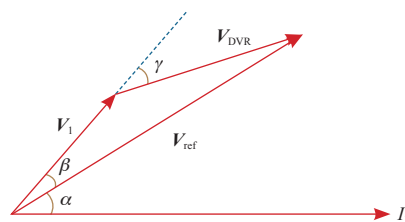


图3 完全补偿法

由图3可以看出，若要电压进行完全补偿，则需从 V_L 末端引出相量 V_{DVR} 到 V_{ref} 末端。因此，对于一个电压幅值跳变为K倍，跳变的相位角度为 β 的电压跌落，所需要补偿的电压相量幅值 V_{DVR} 、补偿相位角 γ 以及DVR消耗的功率如下

$$V_{DVR} = V_{ref} \sqrt{K^2 + 1 - 2\cos\beta} \quad (6)$$

$$\gamma = \arctan \left(\frac{-K \sin\beta}{1 - K \cos\beta} \right) \quad (7)$$

$$P_{DVR} = V_{DVR} I_L \cos\beta \quad (8)$$

2.2.2 选择性补偿控制

在实际微网系统的工作中，常遇到不同敏感元件的重要性有所区别的情况，本文将集中式DVR储能单元的容量大小设为可优先补偿所有重要元件。

假设含有重要敏感元件的馈线分别为 $A_1, A_2, \dots, A_n$ ，简称A类馈线；含有次要敏感元件的馈线分别为 $B_1, B_2, \dots, B_m$ ，简称B类馈线。如图4所示，当各条馈线检测到各自的电压跌落时，则发出高电平信号“1”。

由图4逻辑信号图可知：当图中位置C发出的信号为低电平“0”时，则表示A、B两类馈线中

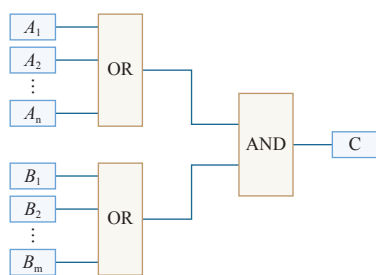


图4 选择控制逻辑信号图

仅有一类发生电压跌落的情况，此时集中式DVR的补偿开关正常动作，对相应的馈线进行电压补偿；当图4中位置C发出的信号为高电平“1”时，则表示A、B两类馈线都有发生电压跌落的情况，此时置零所有B类馈线上的信号，馈线 $B_1, B_2, \dots, B_m$ 上的补偿开关均不动作，以保证重要元件上各条馈线的电压稳定。

3 仿真及实验结果分析

本文基于Matlab/Simulink软件模拟集中式DVR可针对两条馈线进行补偿的情况进行仿真。模型结构如图5所示。

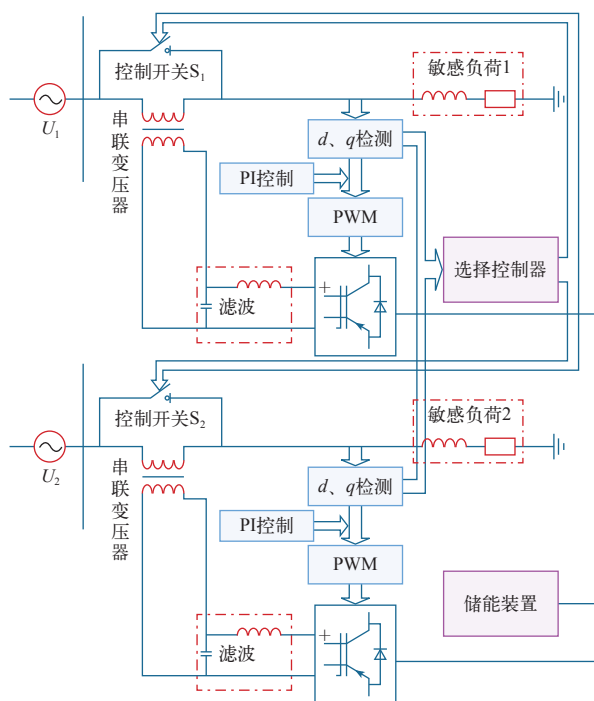


图5 仿真模型图

参数选择：微电网电压380 V，频率50 Hz，敏感负荷1的功率1 000 W，敏感负荷2的功率2 500 W；

DVR选取滤波器中 L 取6 mH， C 取0.02 mF；PWM信号发生器的载波频率取104 Hz；馈线1的扰动线路中，故障电阻 $2\ \Omega$ ，接地电阻 $0.01\ \Omega$ ；馈线2的扰动线路中，故障电阻 $4.6\ \Omega$ ，接地电阻 $0.01\ \Omega$ 。

3.1 单一馈线电压跌落

设定馈线1为故障线路，馈线2正常运行，运行结果如图6和图7所示。

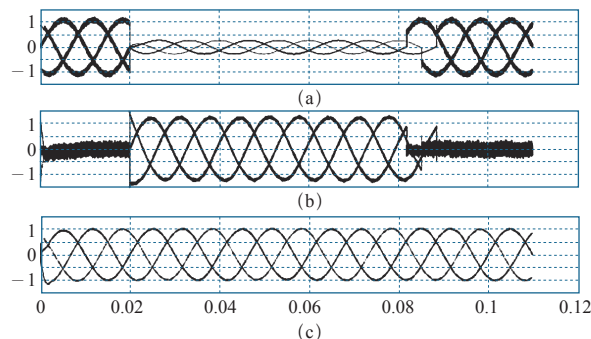


图6 单馈线三相跌落补偿

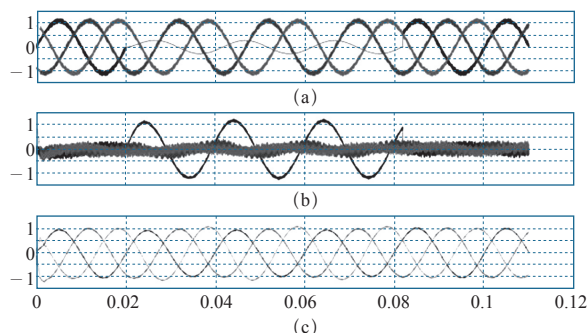


图7 单馈线单相跌落补偿

图6为馈线1发生三相故障的情况。故障发生时间为0.02 s，故障切除时间为0.08 s。图6a、b和c分别为馈线1中的线路电压、DVR₁的补偿电压以及敏感负荷1前的电压。图7为馈线1发生单相故障的情况。由图7可见，集中式DVR在单馈线发生故障时可有效保证敏感负荷前电压的稳定。

3.2 多馈线电压同时跌落

3.2.1 仅含A类或B类的多条馈线同时跌落

设定馈线1、2均为A类或B类馈线，两条馈线同时发生电压跌落，运行结果如图8和图9所示。

故障发生时间为0.02 s，故障切除时间为0.08 s。图8a、b和c图分别为馈线1中的线路电压、DVR₁的补偿电压以及敏感负荷1前的电压；图9a、b和c图

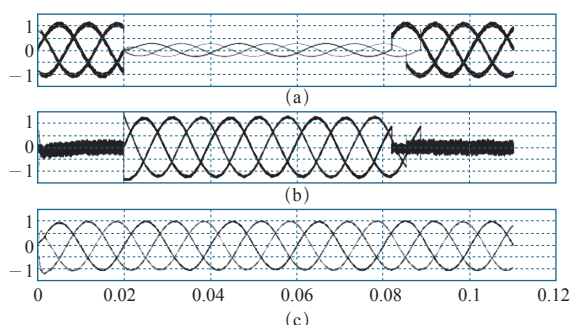


图8 馈线1电压补偿情况

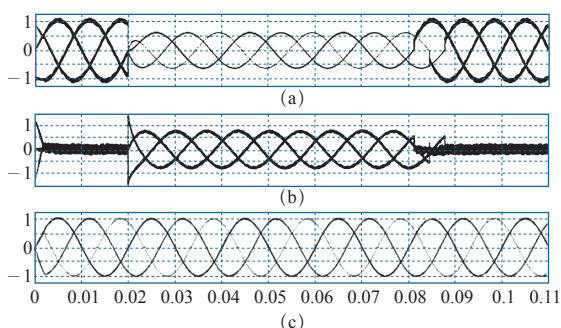


图9 馈线2电压补偿情况

分别为馈线2中的线路电压、DVR₂的补偿电压以及敏感负荷2前的电压。由图8、图9可见，集中式DVR在两条线路同时发生故障时进行电压补偿，保证了敏感负荷前电压的稳定。

3.2.2 同时包含A类、B类的多条馈线同时跌落

设定馈线1为A类馈线，馈线2为B类馈线。两条馈线先后发生电压跌落，馈线2故障发生时间为0.02 s，切除时间为0.08 s。馈线1故障发生时间为0.04 s，切除时间为0.08 s。运行结果如图10所示。

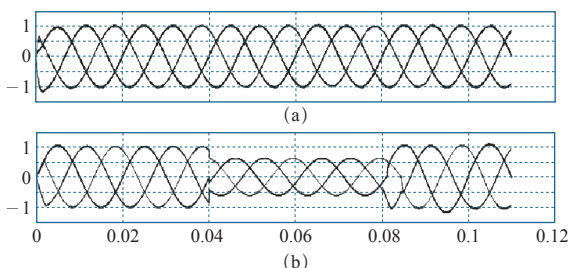


图10 两类馈线同时跌落情况

图10中，图10a为馈线1的补偿情况，图10b为馈线2的补偿情况。由结果可知：馈线2在0.04 s的时刻失去补偿，选择控制器起作用，优先补偿重要负荷。这对于重要负荷应对长时间、深度电压跌落的情况有着明显的效果。

4 结束语

针对现行常规DVR使用率低、经济性差，而IDVR无法应对多馈线路同时跌落等问题，本文提出一种集中式DVR的拓扑结构，并从单一馈线电压跌落与多馈线同时电压跌落两方面分别进行理论分析与仿真对比实验，验证了集中式DVR的可行性与优越性。

具体如下：①相较于常规DVR，集中式DVR同时接在不同的馈线上，大大提高了其使用率，具有更好的经济性。②由于集中式DVR中所有馈线共用一个较大的储能装置，所以针对单一馈线跌落的情况，其补偿时间更长，补偿效果更好。③对于多条馈线同时跌落的情况，集中式DVR可对多条馈线同时进行电压补偿，且对较为重要的元件优先补偿。

参考文献

- [1] 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 (5): 20-33.
- [2] 王云玲, 曾杰, 张步涵, 等. 基于超级电容器储能系统的动态电压调节器 [J]. 电网技术, 2007, 31 (8): 58-62.
- [3] 周龙, 齐智平. 解决配电网电压暂降问题的飞轮储能单元建模与仿真 [J]. 电网技术, 2009, 33 (19): 152-158.
- [4] 付学谦, 陈皓勇, 李国栋, 等. 基于光伏发电的DVR补偿配电网电压暂降 [J]. 华东电力, 2013 (9): 1794-1799.
- [5] Ashari M, Hiyama T, Pujiantara M, et al. A novel dynamic voltage restorer with outage handling capability using fuzzy logic controller [C]. 2nd International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2007), Kumamoto, Japan, 2007: 51-54.
- [6] 刘艳, 艾欣, 雷之力. DVR 和逆变式微电源配合补偿微电网中电压暂降问题的研究 [J]. 现代电力, 2009, 26 (3): 13-18.

(下转第93页)

种试验手段综合诊断主变压器运行状态, 确保设备安全运行。

2) 历史试验数据对于变压器出口短路后的试验分析具有很大的参考价值, 应重视交接验收和例行试验, 并保存好试验数据。

3) 建议开展110 kV变压器基建、大修后的局部放电试验工作, 做到缺陷故障的早发现、早处理, 提高设备运行的可靠性。

4) 针对该起变压器事故经验, 建议今后加强变压器选型、订货、验收及投运的全过程管理。应选择具有良好运行业绩和成熟制造经验生产厂家的产品。批量供货的变压器厂家, 应抽样进行突发短路试验验证。

参考文献

- [1] 闫振华, 马波, 马飞越, 等. 220 kV电力变压器短路动力学性能分析[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 79-87.
- [2] 胡海宁, 周力行, 李季高, 等. 近区短路对变压器的影响及诊断方法[J]. 变压器, 2013, 50(11):

73-76.

- [3] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [4] 俞华, 王天正, 闫智鹏. 油中溶解气体分析在电力变压器故障诊断中的应用[J]. 山西电力, 2014(2): 21-23.
- [5] 赵世钦, 刘大勇. 油中溶解气体分析法在变压器故障诊断中的应用[J]. 吉林电力, 2015, 43(6): 38-41.
- [6] GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [7] DL/T 911—2004 电力变压器绕组变形的频率响应分析法[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] DL/T 1093—2008 电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [9] Q/GDW 1168—2013 输变电设备状态检修试验规程[S].

(收稿日期: 2017-02-25) **EA**

(上接第64页)

- [7] 李勇汇, 吕艳萍, 彭辉, 等. 一种基于分布式电源的串联补偿方式的设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 158-164.
- [8] 尹婷, 陈轩恕, 刘飞, 等. 基于混合储能系统的动态电压恢复器[J]. 高电压技术, 2009(1): 181-185.
- [9] 贾东强, 韦统振, 霍群海, 等. 双DVR协同补偿的运行模式研究[J]. 电力自动化设备, 2013(9): 74-81.
- [10] 雷之力, 艾欣, 崔明勇. 微网电压暂降串并联协调补偿策略[J]. 华北电力大学学报: 自然科学

版, 2010, 37(5): 1-5.

- [11] 周雪松, 张智勇, 马幼捷. 级联动态电压恢复器的研究[J]. 电网技术, 2007(12): 74-77.
- [12] Vilathgamuwa D, Wijekoon HM, Choi SS. A novel technique to compensate voltage sags in multilne distribution system - the interline dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1603-1611.
- [13] 刘建. 馈线间动态电压恢复器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

(收稿日期: 2017-03-24) **EA**