

# 动态电压恢复器 (DVR) 研究现状与发展综述

郝晓弘 杜先君\* 陈伟

(兰州理工大学 电信工程学院, 兰州 730050)

**摘要** 动态电压恢复器 (DVR) 是一种串联型补偿装置, 其良好的动态性能和很高的性价比使得它成为治理动态电压问题, 特别是电压凹陷的最经济、有效的手段。首先介绍了动态电压恢复器 (DVR) 的功能、组成及其特点, 然后就目前国内有关 DVR 研究的现状、存在的问题进行了详细的阐述和分析, 最后讨论了 DVR 的发展趋势。

**关键词** 电能质量 电压凹陷 动态电压恢复器 (DVR)

中图分类号 TM761.12; 文献标志码 A

动态电压恢复器 (DVR) 是近年来出现的 DFACTS 装置, 它串联于电源与敏感负荷之间, 负荷正常运行时 DVR 被旁路, 由系统提供电压; 当发生电压凹陷时, DVR 可以在 ms 级内, 对电压凹陷进行有效补偿。由于 DVR 只在电压凹陷出现时提供负荷满足正常电压所需的功率消耗, 所以效率较高, 而且其费用低于 UPS、CVT、MG 等装置, 其良好的动态性能和很高的性价比使得它成为治理动态电压问题, 特别是电压凹陷的最经济、有效的手段。1988 年 N. G. Hingorani 博士提出了 Custom Power 概念, 其后近 10 年时间内基于 VSI (Voltage Source Inverter) 的电能质量控制技术的迅速发展, 使 DVR 的理论及实践基础被建立。1996 年, 美国 Westinghouse Electric Corporation 在西部电子展览和会议 (Wescon) 上首次发表了 DVR 的研究报告以及实验结果<sup>[1]</sup>。同年 8 月, 世界上第一台 2 MVA 的 DVR 在美国北卡罗来纳州 Duke 电力公司投入工业运行<sup>[2]</sup>。自此之后, DVR 的研究及应用拉开大幕。这

其中 ABB 公司于 2000 年在以色列一家著名的微处理器制造厂投入运行的两套 DVR 是当今世界上最大的, 单套容量均为 22.5 MVA, 该 DVR 的响应时间小于 1 ms 可补偿持续时间达 500 ms 的三相电压凹陷的 35% 和单相电压凹陷的 50%; Siemens 公司于 1999 年 5 月在加拿大 Dawson Creek 地区一条 12.5 KV, 500 KVA 的配电线上安装了世界第一台杆上紧凑型 Platform Mounted DVR (即 DVR<sup>TM</sup> PM)<sup>[3]</sup>。DVR<sup>TM</sup> PM 采用直接从电网获取能量的方式, 省去了附加直流储能设备所带来体积、设备造价以及维护的费用。除此之外, 世界上还有很多国家和研究机构正在研制各自的 DVR, 并有相应的产品投入使用。

## 1 DVR 结构

一个 DVR 的典型主电路结构如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 典型的 DVR 装置主电路包括储能装置、逆变器、滤波器和串联变压器四部分。与 UPS 电源一样, 在系统电压出现偏差时, DVR 和系统之间必然会进行能量交换, 储能装置就是给 DVR 提供能量的部分, 主要有利用大电容储能、利用不可控整流由电网提供能量、超导储能以及一些其他的储能方式; 逆变器通过对储能装置提供

2007 年 11 月 9 日收到 甘肃省科技攻关项目 (GS044-A52-001-24) 资助  
第一作者简介: 郝晓弘 (1965-), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电能质量分析, 先进控制理论。

\* 通信作者简介: 杜先君 (1979-), 男, 浙江富阳人, 硕士, 研究方向: 电力系统自动化、电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: onodudu@163.com.

的直流电压的逆变产生系统所需补偿电压,实践证明不同结构的逆变器具有各自的优缺点,如桥式逆变器普遍存在桥臂直通的问题,而推挽式的逆变器不存在桥臂直通的问题,且于低输入电压时,在输出功率相同的情况下开关损耗较小,适用于低压输入的大功率变换器。另外,目前研究热点之一的三相四桥臂逆变器,是在三相桥式逆变器的基础上增加一个桥臂,用以形成输出中点,减小不平衡负载时三相输出的不对称度。但是,对这种逆变器的控制相对比较复杂;滤波器的作用是消除由逆变器产生的高次谐波,使系统所需补偿电压尽量“纯净”。所以,滤波器的位置选择在滤波器性能的考虑范围之内。不同位置安装会出现不同效果,如在逆变器的输出侧,这时最接近谐波源,使其能更有效地改善谐波问题;也可以选择利用串联变压器的电感线圈与滤波电容一起构成滤波器,此时可以节省元器件。但是,同时会增加串联变压器的容量<sup>[4]</sup>;输出端的串联变压器是 DVR 与系统的耦合部分,一般采用串联的形式。由此可知,当 DVR 的检测控制电路检测到系统电压发生畸变(主要是电压凹陷和电压上升)时,就会控制储能装置提供所需补偿的直流电压,经过逆变器获得所需的补偿电压波形,再通过串联变压器补偿系统电压,使负载稳定运行。

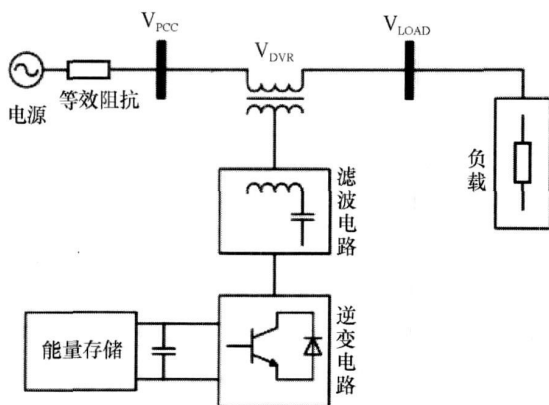


图 1 典型 DVR 结构图 ( $V_{PCC}$  为系统公共结点电压、 $V_{DVR}$  为动态电压恢复器给出的补偿电压、 $V_{LOAD}$  为敏感负载侧电压)

## 2 DVR 研究现状

世界范围内动态电压恢复器研制热潮的兴起,说明了具有优异动态特性的 DVR 技术在提高电能质量方面可以起到重要的作用。目前关于 DVR 的研究主要集中在以下几个方面:

(1)对 DVR 装置拓扑结构、储能单元、逆变器及开关器件的研究

拓扑及储能方面的研究以解决储能单元容量与补偿能力之间的矛盾为主要研究内容,力求以相对较小的储能单元容量补偿相对较长时间的电压凹陷。一个可连续运行的动态电压恢复器 (Uninterrupted DVR) 的结构原理为直流储能单元由整流电路从电网直接获取能量,使得储能单元容量可以不受元件限制而长时间的给系统提供直流电压。

另外,储能单元的介质选取也是 DVR 的研究内容之一。目前,新型的储能元件的问世也为 DVR 提供了更好的储能能力。但是,具体使用问题及配合问题仍需进一步加以研究解决。比如,利用 SMES、超级电容和铅酸电池等作为 DVR 的储能单元的实验结果令人满意,同时也为更大容量的 DVR 设备提供设计参考<sup>[5-8]</sup>,而在文献 [9, 10] 中则着重介绍了如何设计储能单元的容量大小以达到最优性价比,使 DVR 产品在低功率应用场合更具市场竞争力。文献 [11] 则对四种常用 DVR 拓扑进行了详细的理论及实验对比,并得出四种拓扑各自的性能特点和不同的性价比。逆变器方面的研究中,主要以提高开关速度、降低装置损耗为目的,同时对新的电力电子器件在 DVR 中的应用作相应的研究。比如在逆变器中,利用 IGBT、Cryo-Mosfet 器件来替代传统 IGBT 器件,可以提高开关的速度,减小延时和谐波,减小 DVR 装置的稳态损耗<sup>[12, 13]</sup>。

(2)对输出侧滤波器的研究

因为在引入串联变压器的情况下,滤波器的位置将对 DVR 的性能带来影响,所以这方面的研究通过对在不同位置安装滤波器的滤波策略的比较来得到安装的、最佳最经济的位置。图 2 给出了滤波

器的安装位置示意, A位置为逆变器侧, B位置为变压器侧, C位置为线路侧。

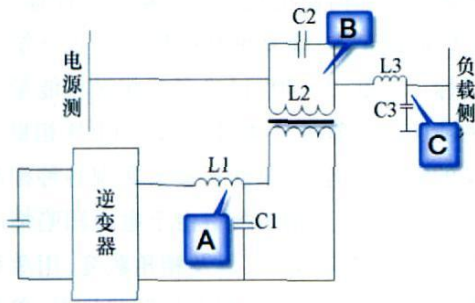


图 2 滤波器安装位置示意图

在 DVR 装置的逆变器侧和线路侧安装滤波器是两种最广泛采用的滤波策略,文献[4]就给出了这两种策略的设计思路,并对比研究了这两种策略的效果以及对整个装置的影响。另外,也有研究关于具体的系统设计方法的,如文献[14, 15]就分别介绍了在逆变器侧和线路侧安装滤波器的设计方法,并且详细分析了滤波器参数选择对装置各部分电流等级、容量的影响。文献[16]则在考虑系统性能(主要是 LC 电路截至频率对控制带宽的影响)和逆变器设计容量后提出一种 LC 滤波器设计依据,并以此依据建立实验装置进行实验测试,证明其可以在优化逆变器容量的情况下而不影响系统的良好控制效果。文献[17]则提出了加多级滤波的设计方法,即在公用侧和负载侧加装两组电容滤波器,虽然设计成本有所提高,但从实验结果的对比数据可以看出,滤波效果以及负载上得到的电压波形质量均有更好的表现。

### (3)对串联变压器的研究

这部分的研究内容主要是变压器的容量大小、变比的选择以及如何在系统中设计经济有效的变压器的方法。文献[18]以变压器损耗为目标函数,就动态电压恢复器串联注入变压器的设计进行了探讨,提出了一种总损耗最小及负载损耗最优的设计方法,并给出了具体的设计实例。文献[19]提出通过引入自适应因子(Adaptive Form Factor)来限制涌流,使设计 DVR 选取串联变压器等级时不需要考虑 DVR 开始补偿时的瞬态过程中的涌流的饱和作

用,同时消除了选取过大的变压器等级造成的稳态运行的冗余性。文献[20]对注入变压器发生过饱和的机理进行了相应的分析,提出了抑制注入变压器发生过饱和时的高次谐波注入控制策略及算法,并通过计算和仿真验证了算法的正确性。同时,结合 DVR 拓扑提出不使用串连变压器,而使用电容耦合的设计方法也是一个研究方向<sup>[21-23]</sup>,省去了串联变压器使得系统容量及成本降低,此方法控制简单,易于实现,应有广阔应用前景。

### (4)对控制策略的研究

这方面主要研究有两方面内容:一是研究逆变器的结构和控制策略,用以改善 DVR 的补偿能力;二是研究 DVR 的系统控制策略,力求控制策略简单、全面,用以改善 DVR 的动态性能。文献[24, 25]提出将电压空间矢量脉宽调制技术应用于 DVR 装置,结合软件锁相环(SPLL)技术实现对伴随凹陷出现的相位跳变的补偿,瞬时控制负荷端电压的  $\alpha$   $\beta$  0分量以实现零序分量的补偿,并且可以提高直流侧效率。文献[26-28]针对采用线性的 PI 控制器来控制 PWM 逆变器是非线性环节,只能在局部区域内保证逆变器的良好性能的问题,提出了 DVR 装置的神经网络控制方法,以改善非线性环节的动态性能。文献[29]提出了 DVR 的电压和电流的多闭环控制策略,改善了控制器的阻尼特性和在变负荷情况下的负荷参考电压跟踪能力,以提高其动态和稳态性能。文献[30]对 DVR 逆变电路进行了无差拍控制算法研究,使输出电压跟踪参考电压,实现了对不确定电压补偿分量的跟踪补偿控制。文献[31]提出了一种基于 H<sub>∞</sub>模型匹配技术的电能质量波形跟踪补偿控制新方法,为电压、电流波形跟踪补偿控制精度的进一步提高提供了理论支持,也为相关领域的波形跟踪控制技术的研究提供了一条新途径。

### (5)对电压检测方法的研究

DVR 的实时性要求很高,所以在这方面的研究中,不仅要求所提供的检测方法能够准确地检测出电压凹陷;更重要的是要能满足各种应用场合的实时性要求,可以迅速地检测出电压凹陷。

文献 [32]介绍了常用检测方法后,提出了有实用意义的  $d-q$ 分解平均值法和  $d-q$ 分解低通滤波法,可实现对电压凹陷幅值、持续时间和相位跳变进行实时准确检测。文献 [33-37]提出的一种  $p-q-r$ 坐标变换方法,可将  $abc$ 三相系统电压无延时地变换到  $pqr$ 坐标下的三相电压,而此时只要控制  $p$ 相电压得到其直流分量,就可以准确判断系统电压是否发生凹陷,从而可判断是否启动补偿。该方法对电压的正序、负序及零序分量均有明确定义,控制策略简单,可为实现对各序分量的补偿提供相应的补偿量检测基础。其控制框图如图 3 所示,图中  $v_a, v_b, v_c$  为三相电源电压,  $v_p, v_q, v_r$  为经  $pqr$ 变换后的三相电压,  $v_{cp}, v_{cq}, v_{cr}$  为  $pqr$ 坐标下的补偿电压,  $v_{ca}, v_{cb}, v_{cc}$  为经  $pqr$ 反变换后得到的  $abc$ 坐标下的补偿电压,  $v_{aREF}$  和  $v_{bREF}$  为变换参考电压,  $V_{RMS}$  为基波电压有效值。

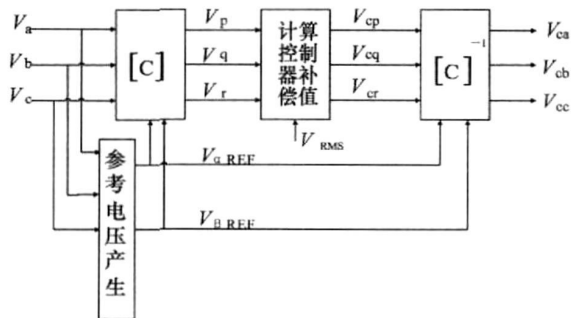


图 3 滤波器安装位置示意图

文献 [38]提出了基于 HHT 的电能质量检测方法,该方法由经验模态分解法 (EMD) 和 Hilbert 变换 (HT) 两部分组成,同时适用于非平稳和平稳的实时信号分析。通过该方法可以确定非平稳的电能质量扰动信号的时间、频率和幅值信息;同样也可以精确地检测出谐波的幅值和频率。另外,在小波变换的基础上,结合其他实用检测方法也可以实现对电能质量扰动的检测与识别。比如,利用  $d-q$ 变换有效值的特征和小波变换对突变信号的敏感性,能对电压凹陷、上升等多种电能质量扰动进行检测与识别,具有较高的识别正确率,并能计算出各种扰动的特征参量。

### (6) 对补偿策略的研究

在补偿范围相同的情况下, DVR 串联侧采取不同的电压补偿策略会对装置的容量以及性能产生很大的影响。如何使得装置的容量尽可能地小、能够更长时间的工作、能有更高的性价比是补偿策略研究目标。文献 [39, 40] 讨论了单相最小能量补偿的各种情况。在单相 DVR 中,可以用电压相量来描述系统的电压凹陷,并根据相量来实现各种控制目标的优化。然而,三相系统中由于电压凹陷情况比较复杂,电压存在不对称,以及相角跳变,用单相的电压相量很难确切描述三相电压凹陷情况,单相的补偿方法无法应用到三相系统中。文献 [41] 讨论了 DVR 装置中能量流动和补偿电压控制的问题,并提出了可以补偿电压浪涌和保证最小能量补偿的电压补偿轨迹;同时考虑了实际系统中 DVR 装置存在等效阻抗情况下的改进电压补偿策略。文献 [42] 采用对称分量法对能量优化进行分析,直接将 DVR 的输出电压等效成正序补偿电压,没有考虑负序和零序电压的影响,理论计算与实际的输出有一定的误差。文献 [43] 通过旋转三相参考电压的方法来提高 DVR 的补偿范围,同时也考虑了负序和零序电压对输出电压的影响,并通过求解最优能量旋转角来减少 DVR 输出的有功功率。文献 [44] 提出了按照负荷能承受的电压范围限值进行补偿,以进一步减小 DVR 的有功功率输出或增大 DVR 的恢复能力。文献 [45] 在综合了负荷电压固定补偿、同相电压补偿和最小能量补偿三种补偿策略的优点而避免了各自的缺点,提出了一种能量稳定控制策略,这种补偿策略在实现 DVR 补偿目标的同时,可以减少 DVR 的有功输出,延长了补偿时间,降低了设备的容量和造价。

## 3 结语

经过这十几年的发展,国内外关于动态电压恢复器的理论和实验研究已经取得了长足的进步。但随着新环境、新器件和新的设计方法的涌现,对广大研究者来说,仍然存在一些可进一步深入探讨的方面:

(1)利用对各扰动成因的深入研究,在DVR的动态特性上进行改进,包括研究检测方法的实时性、可靠性、鲁棒性;简化控制器设计,使其更易于实现;控制策略的简单化;补偿策略的全面化。

(2)对DVR投入运行后由于其本身的负载特性对补偿效果的影响、对电网及用户产生的影响应如何分析、控制;另外作为电压型补偿装置,探讨其与电流型补偿装置共同运行的一些具体问题是很有必要的。

(3)由于DVR系统串联于系统和负荷之间,在线运行时,其所在线路的负载特性对DVR行为的影响、DVR耐短路故障电流能力、绝缘水平以及对DVR的保护方式和相应的保护策略也需要开展深入细致的研究。

(4)对DVR功能的扩展,使其不仅可以改善电压凹陷、上升和谐波等电能质量问题,同时也可以对如闪变等其他的电能质量问题进行改善和抑制。

### 参 考 文 献

- Sanra N A, Sundaram A. The role of the distribution system dynamic voltage restorer in enhancing the power at sensitive facilities. Wescon Conference Record, 1996; 167-181
- Woodly N H, Morgan L, Sundaram A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer. IEEE Trans on Power Delivery, 1999; 14(3): 1181-1186
- Woodley N H. Field experience with dynamic voltage restorer system. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000; 4: 2864-2871
- Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. A comparative study of inverter-side and line-side filtering schemes in the dynamic voltage restorer. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000; 4: 2967-2972
- Zhao Huiyuan, Zhao Caihong, Zhang Zhifeng, et al. 20 kVA superconductive magnetic energy storage data acquisition system and the controller of VSI. International Conference on Power System Technology, 2006; 10: 1-4
- Cheng Yonghua, Van Mierlo J, Van den Bossche P, et al. Using super capacitor based energy storage to improve power quality in distributed power generation. 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006; 8: 537-543
- Ghosh A, Jindal A K, Joshi A. Design of a capacitor-supported dynamic voltage restorer (DVR) for unbalanced and distorted loads. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004; 19(1): 405-413
- Zhan C J, Wu X G, Krm lidis S, et al. Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003; 150(2): 175-182
- Seng L Y. A algorithm for designing the size of energy storage in dynamic voltage restorer. International Conference on Industrial and Information Systems, 2006; 8: 46-51
- Silva S M, da Silveira S E, Reis Ad S, et al. Analysis of a dynamic voltage compensator with reduced switch count and absence of energy storage system. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005; 41(5): 1255-1262
- Nielsen J G, Blaabjerg F. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005; 41(5): 1272-1280
- Toni W, Peter D, David A, et al. Power supply quality improvement with a dynamic voltage restorer (DVR). Proceedings on EMPD, 1998; 2: 518-525
- Ming Fang, Gardiner A I, MacDougall A, et al. A novel series dynamic voltage restorer for distribution systems. In: Proceedings of International Conference on Power System Technology, 1998; 1: 38-42
- Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002; 17(3): 857-864
- Li B H, Choi S S, Vilathgamuwa D W. Design considerations on the line-side filter used in the dynamic voltage restorer. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2001; 148(1): 1-7
- Kim H S, Kim J H, Sul S K. A design consideration of output filters for dynamic voltage restorers. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004; 6: 4268-4272
- Huang C J, Huang S J, Pai F S. Design of dynamic voltage restorer with disturbance-filtering enhancement. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003; 18(5): 1202-1210
- 尹忠东, 陈安源. 动态电压调节器串联注入变压器的一种设计方法. 变压器, 2005; 42(9): 15-19
- Fitzer C, Anilampalam A, Bames M, et al. Mitigation of saturation in dynamic voltage restorer connection transformers. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002; 17(6): 1058-1066
- 尹忠东, 张卫华, 韩民晓. 动态电压恢复器注入变压器过饱和抑制. 电力系统自动化, 2004; 28(24): 28-31
- Li B H, Choi S S, Vilathgamuwa D W. Transformerless dynamic voltage restorer. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002; 149(3): 263-273

- 22 Sng E K K, Choi S S, Vilathgamuwa D W. Analysis of series compensation and DC-link voltage controls of a transformerless self-charging dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004; 19(3): 1511–1518
- 23 Lam C S, Wong M C, Han Y D. Per-unit design of a transformerless H-bridge dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current mode control. *Fourteenth IAS Annual Meeting Industry Applications Conference. Conference Record of the 2005*; 4: 2420–2427
- 24 Zhan Changjiang, Ramachandramurthy V K, Anulampalam A, et al. Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001; 37(6): 1855–1863
- 25 Zhan Changjiang, Anulampalam A, Jenkins N. Four-wire dynamic voltage restorer based on a three-dimensional voltage space vector PWM algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003; 18(4): 1093–1102
- 26 Jurado F, Hidalgo F P. Neural network control for dynamic voltage restorer. *IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, 2002; 1: 615–620
- 27 Hang Deng, Onganti R, Srinivasan D. A multi-layer neural network controller for single-phase inverters. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2003; 1: 370–375
- 28 Hang Deng, Onganti R, Srinivasan D. A neural network-based adaptive controller of single-phase inverters for critical applications. *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2003; 2: 915–920
- 29 Vilathgamuwa D M, Perera A A D R, Choi S S. Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current mode control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002; 17(5): 824–834
- 30 马振国, 李鹏, 赵保利, 等. DVR电压波形跟踪无差拍控制方法. *电力自动化设备*, 2005; 25(3): 13–17
- 31 李鹏, 杨以涵. 电能质量的  $H_\infty$  最优控制方法. *电工技术学报*, 2005; 20(10): 88–93
- 32 肖湘宁, 徐永海, 刘昊. 电压凹陷特征量检测算法研究. *电力自动化设备*, 2002; 22(1): 19–22
- 33 Kim H S, Akagi H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. *Conference Records of IEEE/PEDS '99*, 1999; 422–427
- 34 Kim H S, Blaabjerg F, Bak-Jensen B, et al. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002; 17: 701–710
- 35 Kim H S, Blaabjerg F, Bak-Jensen B. Spectral analysis of instantaneous powers in single-phase and three-phase systems with use of p-q-r theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002; 17: 711–720
- 36 Kim H S, Lee S J, Sul S K. A calculation for the compensation voltages in dynamic voltage restorers by use of PQR power theory. *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2004; 573–579
- 37 Lee S J, Kim H S, Sul S K, et al. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004; 19(3): 814–827
- 38 李天云, 赵妍, 李楠, 等. 基于 HHT 的电能质量检测新方法. *中国电机工程学报*, 2005; 25(17): 52–56
- 39 Nielsen J G, Blaabjerg F, Mohan N. Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump. *Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2001; 2: 1267–1273
- 40 Choi S S, Li B H, Vilathgamuwa D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000; 15(1): 51–57
- 41 杨潮, 韩英铎, 黄瀚, 等. 动态电压调节器串联补偿电压研究. *电力自动化设备*, 2001; 21(5): 1–5
- 42 Vilathgamuwa D M, Perera A A D R, Choi S S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003; 18(3): 928–936
- 43 张秀娟, 杨潮, 唐志, 等. 串联型电能质量控制器注入电压的研究. *中国电机工程学报*, 2003; 23(2): 15–20
- 44 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器电压补偿策略的研究. *电力系统自动化*, 2004; 28(6): 68–72
- 45 张迪, 姜齐荣, 张秀娟. 动态电压恢复器的能量稳定控制. *电网技术*, 2006; 30(1): 14–18

(下转第 1267 页)

## Mean Value Involving the Smarandache LCM Dual Function

ZHAO Jiao-lian, DUAN Wei-guo

(Department of Mathematics, Weinan Teachers' College, Weinan, Weinan 714000, P. R. China)

[Abstract] For any positive integer  $n$ , the F-Smarandache LCM dual function  $SL^*\left(\frac{n}{k}\right)$  is defined as the greatest positive integer  $k$  such that  $[1, 2, \dots, k]$  divides  $n$ . The main purpose is to use elementary methods to study the mean value property of  $\frac{SL^*\left(\frac{n}{k}\right)}{n}$ , and give an interesting asymptotic formula for it.

[Key words] F-Smarandache LCM function, mean value, asymptotic formula

(上接第 1264 页)

## Survey on Research Dynamic Voltage Restorer

HAO Xiao-hong, DU Xian-jun\*, CHEN Wei

(School of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China)

[Abstract] Dynamic Voltage Restorer(DVR) is a series compensating device. It is the most economical and effective means to solve the power quality problems, especially the voltage sags, because of its good dynamic characteristics and high cost-effective characteristic. The DVR's function, topology and its feature are mainly introduced, analyzed the research actuality and the existing problems of DVRs, and finally discussed the DVR's development direction and trends.

[Key words] power quality, voltage sag, dynamic voltage restorer(DVR)