

动态电压调节器（DVR）的结构分析及性能比较

张秀娟 姜齐荣

（清华大学电机工程与应用电子技术系 FACTS 研究所，北京 100084）

1 引言

非线性和冲击性负载的增长导致了許多电能质量问题，例如电压跌落、闪变、电流谐波、不平衡等^[1]。这些问题严重影响了电力系统的稳定和敏感性用户的安全。为了解决这些问题，人们提出并试验了许多方案，例如针对电流问题的有源滤波器（APF），针对电压问题的动态电压调节器（DVR），针对无功补偿的静态无功发生器（STATCOM），针对敏感性负荷的不间断电源（UPS）等^[2]。动态电压调节器DVR（Dynamic Voltage Regulator）是一种串联型电能质量调节器，采用基于电力电子器件的PWM逆变器结构，其主电路由以下四个部分组成：基于全控器件的电压源型逆变器、输出滤波器、串联变压器和直流储能单元。其基本结构及与电力系统的连接如图1所示。

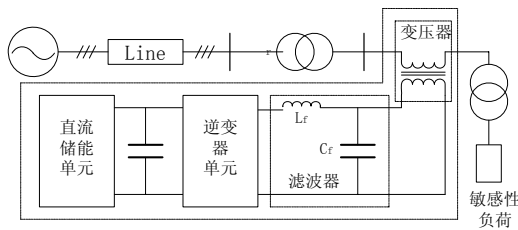


图1 DVR基本结构及与系统联接单线图

DVR 相当于一个串联在配电系统中动态受控的电压源，采用适当的控制方法可以使该电压源输出抵消电力系统扰动对负荷电压造成的不良影响，如电压跌落、电压不平衡及谐波等。当直流侧能量通过从系统整流获得时，在系统侧即使发生单相故障，其它两相仍可以提供电能来维持 DVR 的正常运行，补偿长期的电压跌落也成为可能。如果在直流侧电容两端并联蓄电池，或采用大容量电容储能，该装置还可起到 UPS 的作用，即在系统侧发生短期故障时可以向负荷提供一定时间的功率。采用合适的拓扑结构，DVR 可以综合地治理配电系统中的动态电压质量问题如跌

落、浪涌和稳态电压质量问题如谐波、波动、三相不平衡，是一个多目标的电压质量综合治理装置。

1996年8月，西屋公司（Westinghouse Electric Corporation）在Duke电力公司位于南加州安德森的12.47kV变电站安装了第一台DVR，用于解决一家自动化纺织厂的供电电压问题^[5]。随后ABB公司研制的22KV/4MVA DVR也成功地应用于半导体生产厂的故障电压恢复。ABB还推出了基于IGCT的DVR。SIEMENS公司也在动态电压恢复器的研制上处于先进水平，不仅开发了用于中等电压等级的DVR，还开发了用于大功率负荷的多模块动态电压恢复器以及架空DVR PM（Platform-Mounted DVR）系统^[3]。除了上述的动态电压恢复器实例，世界上还有很多厂家和研究机构正在研制各自的DVR，如Cutler-Hammer，美国威斯康星大学等。清华大学电机系柔性交流输电系统研究所也已经独立研制了一台10kVA/380V的三相DVR样机，实验结果表明该样机性能优越，不仅能有效地解决系统的动态电压质量问题，例如电压跌落、闪变等，还能解决一些稳态的电压质量问题，如三相电压不平衡、谐波等。目前我们正在此基础上研制250kVA/380V的DVR。

世界范围的动态电压调节器研制热潮，说明了串联型电能质量补偿装置在电能质量控制中的重要性。本文将就 DVR 的四个主要部分对其主电路的各种结构进行分析和比较。并以我们研制的10kVA样机为例进行一个详细的介绍。

2 DVR的结构分析

2.1 逆变器结构

DVR核心单元是一个基于全控器件的电压源型PWM逆变器，通过逆变器对直流电压的逆变产生用于补偿系统故障电压的串联交流电压。三相DVR的逆变

器拓扑结构主要有两种：三相桥结构和三单相桥结构。采用前者时，三相输出电压互相关联，控制比较复杂，且无法向系统提供零序电压，因此主要应用于三相三线制系统；采用后者时，三相输出电压互相独立，可以分相控制，且控制简单，对于三相三线制系统和三相四线制系统都可以应用。当系统出现不对称故障时，这种结构的DVR可以就其中的零序进行补偿^[4]。我国的大部分中低压电网基本上都采用三相四线制结构，三相电压不平衡的情况比较常见，所以采用三单相桥结构更为合适。

三单相逆变器每个单相的结构相同，结构形式有半桥逆变器、全桥逆变器和推挽逆变器等。不同结构的逆变器有不同的性能。单相半桥逆变器使用两只开关器件，器件成本较全桥逆变器节省，但其直流侧需要电容分压，存在直流侧两个电容均压的问题。如果直流侧电容不能很好地均压，逆变器输出电压的品质将受到很大的影响。同时，由于直流侧经过了分压，直流侧电压的利用率降低一半，逆变器的输出就必须通过升压变压器接入系统，因而装置在不同电压和功率等级上设计的灵活性降低。全桥逆变器使用的开关器件是半桥逆变器的两倍，装置的成本比半桥高，但不存在电容分压和均压等问题。桥式逆变器都存在桥臂直通的问题，所以两种桥式逆变器都需要可靠的桥臂保护手段来防止桥臂直通。推挽逆变器最大的优点在于任何时候只有最多一个开关器件工作，不存在桥臂直通的问题，在输出功率相同时开关损耗也较小，但是其功率器件的开关集电极电压应力为两倍的电容电压，因而适用于低压大功率变换器。

我们研制的10kVA装置采用三单相全桥结构，各相输出之间完全独立，可以分别向系统注入正、负、零序电压，控制简单。

2.2 串联变压器

串联变压器对装置补偿性能有很大影响，从电路拓扑上看，DVR可以不用串联变压器而直接将逆变器输出的补偿电压滤波后串联注入系统。下面我们对串联变压器进行详细分析。

1. 采用串联变压器结构

采用串联变压器有以下两个方面的优点^[7]：

(1) 采用升压变压器（即逆变器侧电压低于注入电压）结构，可以降低逆变器直流侧电压等级，在高电压等级的场合可以提高装置的可靠性及更加灵活地

选择开关器件。

(2) 将逆变器和电网隔离，使得逆变器直流母线可以直接由电网整流得到。

由于串联变压器的非线性，它在带来以上优点的同时，也带来了不少缺点^{[6][7]}：

(1) 逆变器产生的高次谐波给变压器的设计带来了困难，使得变压器的容量上升。

(2) 串联变压器的短路电抗降低了开环控制的电压精度，影响装置的性能，并产生功率损耗。

(3) 串联变压器的接入影响了串联单元的部分补偿功能（例如系统电压谐波补偿）。

(4) 串联变压器将带来附加的相移和电压降落，从而影响控制器的性能。

另外变压器还存在饱和（saturation）及电压跌落时的瞬间起峰电流（inrush current）等问题。

因此是否采用串联变压器需要综合考虑以上因素。在高压配电网中，考虑到逆变器结构、开关器件电压容量、直流母线电压、装置成本等因素，采用串联变压器是一个较好的选择。在这样的情况下，装置的主要功能将以补偿基波电压波动为主。

串联变压器参数的设计与DVR的主电路的结构，特别是滤波器的位置、系统参数等有很大关系。文[6]详细地讨论了变压器的参数设计。决定变压器原边电压等级的因素有：系统跌落的最大幅度、DVR的控制方法和滤波器的位置，实际上就是由变压器需要输出的电压决定的；原边电流容量和短路电抗则都取决于负荷的额定电流和滤波器的位置；而变比则和副边电压、电流容量互相关联，确定了一个，另外一个就确定了。副边电压等级是由逆变器的输出决定的。当逆变器的结构可变时，其输出电压可变，变压器变比也是可以变化的。可以根据对逆变器的结构、装置成本、装置的性能等方面考虑挑选一个最优的变比。从逆变器侧看变压器可以设计成升压变压器，也可以设计成降压变压器。如果采用降压变压器，逆变器电流容量可以减小。但是，如果直流侧电压是通过不控整流电路提供的，采用降压变压器对减小电流容量是非常有限的。如果设计成升压变压器，可以用较低的直流侧电压获得较高的线路侧输出电压，不过逆变器的电流容量将相应增加，

2. 不采用串联变压器结构

由于串联电能质量控制器需要补偿电压谐波，而且负载电流要流过这个串联变压器，在系统电流谐波

比较大的情况下,就更加增加了损耗,降低系统效率和提高成本。所以,在电压等级较低的应用中,完全可以省去这个串联变压器而采用相对容易设计的电源变压器将直流母线和系统隔离。

在不采用串联变压器时,直流侧与系统的隔离可以采用以下两种方式:利用工频变压器或者高频变压器隔离,如图 2 所示。图 2A 的优点在于线路简单,并且可通过改变变压器 I 的变比来改变直流侧电压的幅度以满足调制比和补偿电压幅度的要求,图 2B 的优点在于直流侧电压非常稳定,有利于逆变器的设计,相对于工频变压器,高频变压器的体积将大大缩小,而且如果增加直流储能单元如蓄电池还可以借助 DC-DC 变换器对蓄电池充电。

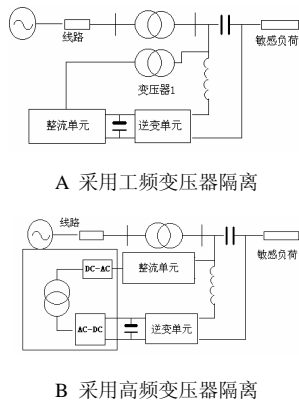


图 2 直流侧隔离结构示意图

文[7]提出了应用于高压配电网的无串联变压器的 DVR 结构。考虑到开关器件的电压和容量,文中提出了两种结构,如图 3 所示:

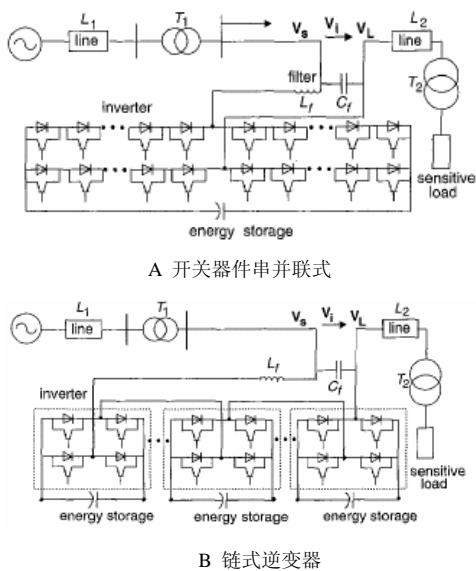


图 3 用于高压系统的无变压器 DVR 结构

两种结构都是三单相全桥结构。图 3A 采用的是桥臂开关器件串联分压+并联分流的方法。这种结构需要注意串联开关管之间的均压和并联桥臂之路之间的均流。图 3B 采用的是多个逆变器串联即链式逆变器结构,这种结构不必要考虑管子之间的均压,但需要仔细控制各个直流侧的电压,使各个逆变器输出保持一致。另外这种结构下,管子的开关频率可能会比较高,因此主电路的损耗及散热问题都需要注意。

我们研制的装置应用于 380V 配电系统中,电压等级比较低,而电压质量问题比较大,需要比较好的补偿性能,所以没有采用串联变压器。使用工频变压器进行系统和装置的隔离,并维持足够高的直流侧电压。

2.3 串联滤波器的设置

如 2.2 节所讨论的,在 DVR 中引入串联变压器后,滤波器的安置地点将对 DVR 的设计和性能带来影响。下图给出了采用串联变压器后滤波器可能的安装位置,以 A、B、C 表示。

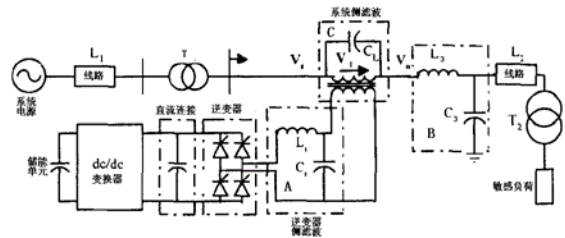


图 4 滤波器放置示意图

如果将滤波器放置在逆变器侧(图中 A 处),它将滤掉逆变器输出电压中的大部分高次谐波,这样可以降低串联变压器的容量。但同时滤波器也会引起补偿电压的相移和幅度衰减,这给滤波器和控制器的设计带来了难度。如果将滤波器放置在线路侧(图中 C 处),则可以利用变压器漏感作为滤波电感从而减少一个滤波电感,滤波器对于控制系统的影响也较小。但缺点在于串联变压器要通过高次谐波,其容量和损耗必然增大,滤波效果也没有放置在逆变器侧好。如果将逆变器输出滤波电感电容放置在线路侧(图中 B 处),同样可以滤除开关频率的谐波。该结构的优点是可以利用 L3 的设计来消除串联变压器漏感的分布参数的影响。在控制上由于 L3, C3 电流直接反映了负载电流的情况,使得控制器可以方便地取样电感或电容电流进行电流模式控制。这个方式也没有解决变压器设计上的困难。文献[9][10]详细的讨论了图 4 中不同

位置的滤波器参数的设计。

2.4 直流储能单元

直流储能单元是 DVR 设计中的重要课题之一。和 UPS 电源一样，在系统发生故障时，DVR 必须向系统提供有功功率，这些能量都由 DVR 的储能单元提供。DVR 的储能单元通常有两种结构：一种是直接采用储能元件，当装置需要向系统注入有功时，这些储能元件可以提供能量；第二种是采用不控整流滤波的方法提供能量。

储能元件有蓄电池、电容、飞轮等。利用大电容储能方式，当系统电压没有跌落的时候，系统通过逆变器给电容充电，电容被充电到一定的数值时，DVR 从系统中切除；当系统发生电压跌落时，逆变器向系统输出功率。在电容电压跌落到一定数值前，可以基本维持用户电压不变。储能电容的容量决定了 DVR 在故障期间可以提供的能量。其设计参数与系统容量以及补偿要求有关，这种储能方式成本较低，但由于受到很多因素的制约，不是非常实用。采用蓄电池作为直流储能单元时，能量的流动完全可控。如果在储能单元之前增加一级直接并联接入系统的 AC-DC 变换器，则可起到三个方面的作用：首先，它是一个充电器；其次，可以采用电流控制的方式，补偿系统电流谐波和无功电流，起到有源滤波器的作用；第三，在采用蓄电池作为储能单元的时候，希望在系统电压没有跌落很多的情况下，通过它直接把系统能量向 DVR 提供。减少电池放电时间，延长电池使用寿命。飞轮储能的主要组成部分是飞轮、轴承等。飞轮储能单元的关键部分是轴承，摩擦小的轴承才能使飞轮储能效率高。现有的电磁轴承摩擦小，寿命长，但是用来稳定和定位飞轮的控制系統较复杂。与其他的储能形式相比，飞轮储能的效率很高，寿命长，没有污染，而且飞轮储能可以安装在地下，可大大节省空间。

除了以上的储能元件外，超导储能（SMES）作为一种特殊新能源也为我们提供了一种选择。SMES 与蓄电池储能、飞轮储能等相比，具有储能密度大、转换效率高（理论上可达 95% 以上）、可四象限运行、吐量大、充放电速度快等优点^[8]。SMES 应用于电压跌落的补偿，其优点是十分明显的：由于线圈是无损的，能量几乎可以瞬间从线圈转换到负载，使 DVR 具有良好的动态性能。不过目前突出的问题是 SMES 的成本很高，如微型 SMES 系统的成本约为 350 美元/kW，其

中变流器约占总成本的 60%，但随着对超导储能的不断深入研究，其成本将会大幅度下降，它的普遍应用也是指日可待的。

利用不控整流从系统中得到能量的方法，使长期补偿成为可能。而且增加一个不控整流桥，也不会增加太多成本，反而可以选取更小的储能电容。降低电容的成本。这种方式的问题是直流侧 100 赫兹低频纹波对输出电压的影响以及低压时无法提供足够高的直流侧电压。当系统发生电压波动的时候，直流母线电压也随着发生波动，需要适当的改变逆变器的输出电压大小，从而稳定负载电压。另外由于采用的是二极管不控整流，能量只能单方向由系统流向直流母线，在系统发生浪涌等扰动时有可能导致能量倒流，由系统通过逆变器流向直流母线，导致直流侧电压升高，损坏开关器件或储能元件，所以抑制能量反向流动是采用该拓扑要解决的重要问题。如果 DVR 主电路中没有采用串联变压器，采用这种储能结构还需要注意桥臂直通的情况。

3 DVR 设计实例

我们研制的 10kVA DVR 的主电路结构如图 5 所示。逆变器采用三单相全桥结构，这种结构可以独立控制各相输出的补偿电压，有利于分相控制；装置可对各相线路注入正序、负序和零序补偿电压；另外在三相三线制系统中，可以采用线电压解耦控制，只需要两相逆变器，这样三个串联装置可以互为备用，可靠性高。由于该装置应用于系统电压等级较低的配电系统，因此没有使用串联变压器。直流侧采用不控整流滤波电路，采用工频升压变压器来维持直流侧的电压并使装置与系统隔离，各相直流侧互相独立，拥有独立的能量回路。整个装置的控制性能及对电压故障的补偿效果非常好。下面给出各项试验的结果。

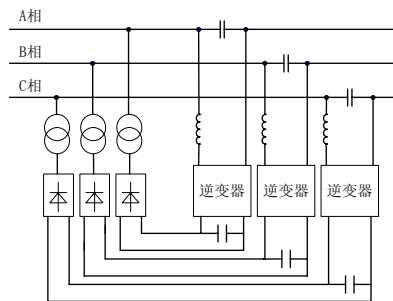


图 5 10kVADVR 主电路结构图

3.1 动态电压跌落补偿

动态电压补偿功能主要是针对系统电压跌落而设计的，系统故障为单相电压跌落，为了便于观察，实验过程中采用 1/2 的分压电阻对输出电压进行采样。图 6 为系统发生 40% 电压跌落情况下装置补偿动态电压跌落的补偿结果。

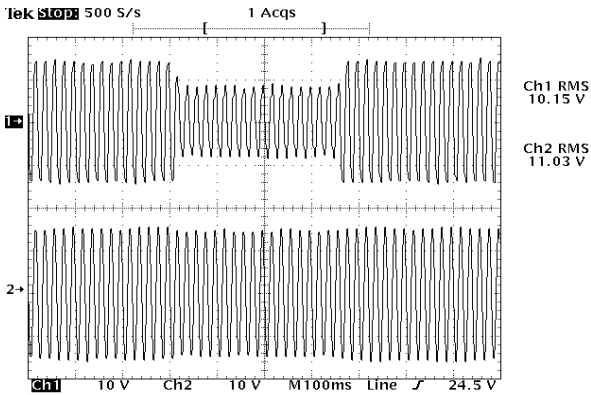


图 6 动态电压跌落补偿效果

3.2 闪变抑制试验

图 7 为串联装置抑制闪变的实验结果，其中通道 3, 4 为系统电压，通道 1, 2 为装置输出电压。为了表示方便，闪变测试实验过程中输出电压额定值设定在 110V。

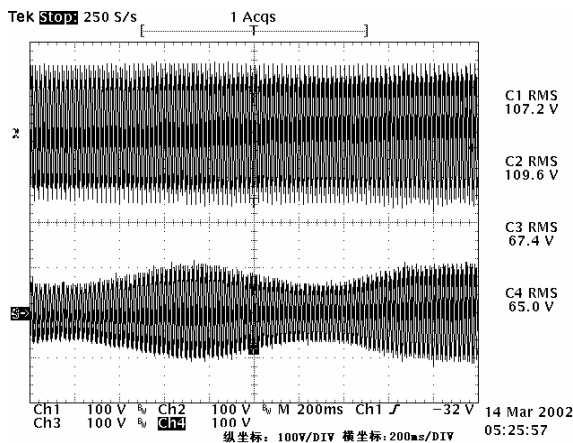
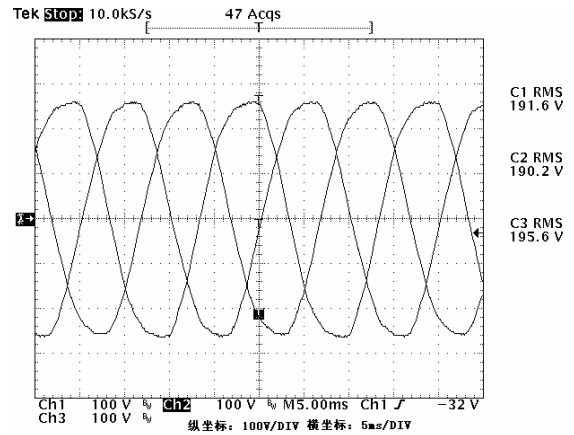


图 7 系统电压闪变补偿实验

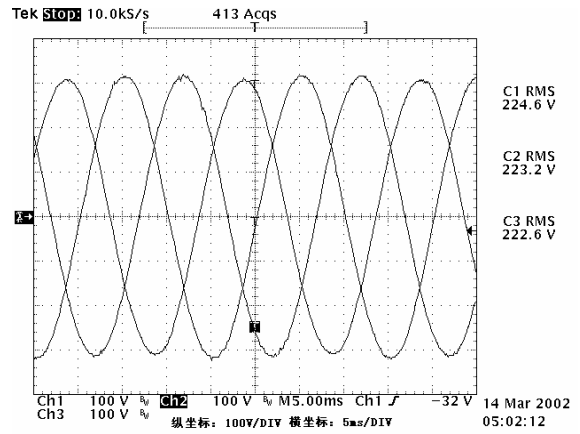
3.3 稳态电压跌落补偿

由于直流侧储能单元采用不控整流的方式，因此，装置具有补偿稳态电压跌落的功能，图 8 为系统电压发生三相不平衡跌落时的补偿情况。系统三相电压分别为 191.6, 190.2 以及 195.6V，通过串联补偿后，可

以将三相电压稳定在 220V 左右。



A 系统侧三相输入电压



B 用户侧三相负载电压

图 8 稳态电压不平衡跌落补偿

3.4 电压谐波补偿

装置的另外一个补偿目标为系统电压谐波补偿，图 9 为系统电压既有 20% 电压跌落又有谐波的情况下串联装置对系统电压的补偿情况。

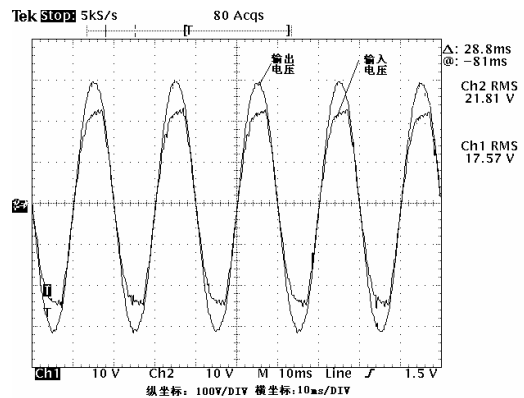


图 9 谐波伴随跌落补偿效果

4 结论

本文对 DVR 的功能和发展情况进行了概述, 并对 DVR 的四个组成部分的结构进行了讨论。讨论了逆变器的拓扑, 其选择主要出于对 DVR 补偿功能的范围及 DVR 成本的考虑; 说明了串联变压器对 DVR 的影响和它的参数设计, 可以看出滤波器的安放位置

对串联变压器的影响很大; 引入串联变压器后, 滤波器不同的安放位置还会影响 DVR 的性能; 对直流储能单元的各种形式及其优缺点进行了说明。结合讨论, 文末给出了一个 10kVA 的 DVR 的设计实例。各种试验的结果表明该 DVR 性能优越, 响应速度快, 能有效的消除动态电压质量问题对敏感性负荷的影响。对治理稳态电压质量问题(谐波等)也有很好的效果。

参考文献

- [1] **New functionalities of the unified power quality conditioner**[C] *Elnady, A.; Salama, M.M.A.* Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES , Volume: 1 , 2001 Page(s): 415 -420
- [2] **Universal custom power conditioner (UCPC) with integrated control** [C] *Changjiang Zhan; Ramachandaramurthy, V.K.; Arulampalam, A.; Fitzer, C.; Barnes, M.; Jenkins, N.* Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE , Volume: 3 , 2001 Page(s): 1039 -1044
- [3] **Field experience with Dynamic Voltage Restorer (DVR/sup TM/MV) systems**[C] *Woodley, N.H.* Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE , Volume: 4 , 2000 Page(s): 2864 -2871
- [4] **The control and analysis of zero sequence components in DVR system** [C] *Il-Yop Chung; Sang-Young Park; Seung-Il Moon; Seong-Il Hur* Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE , Volume: 3 , 2001 Page(s): 1021 -1026
- [5] **Structures and control of a dynamic voltage regulator (DVR)** [C] *Ghosh, A.; Ledwich, G.* Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE , Volume: 3 , 2001 Page(s): 1027 -1032
- [6] **On the injection transformer used in the dynamic voltage restorer**[C] *Li, B.H.; Choi, S.S.; Vilathgamuwa, D.M.* Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on , Volume: 2 , 2000 Page(s): 941 -946
- [7] **Transformerless dynamic voltage restorer**[J] *Li, B.H.; Choi, S.S.; Vilathgamuwa, D.M.* Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- , Volume: 149 Issue: 3 , May 2002 Page(s): 263 -273
- [8] **未来的用户电力技术**[J] 严干贵;姜齐荣;黄民聪. 电力系统自动化, 2002, 26 (1): 62-69
- [9] **Design considerations on the line-side filter used in the dynamic voltage restorer**[J] *Li, B.H.; Choi, S.S.; Vilathgamuwa, D.W.* Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- , Volume: 148 Issue: 1 , Jan. 2001 Page(s): 1 -7
- [10] **Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer**[J] *Choi, S.S.; Li, B.H.; Vilathgamuwa, D.M.* Power Delivery, IEEE Transactions on , Volume: 17 Issue: 3 , Jul. 2002 Page(s): 857 -864

作者简介

张秀娟, 女, 博士研究生, 从事柔性交流输配电和电能质量方面的研究工作

姜齐荣, 男, 副教授, 从事柔性交流输配电和电能质量方面的研究工作