低压动态电压恢复器 2 种滤波器结构的比较与分析

王有云[1],马保慧[1],张厚楷[2],肖国春[2],韩笑黎[2]
(1. 天水电气传动研究所有限责任公司 大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室,甘肃 天水 741020;
2. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:动态电压恢复器(DVR)是一种重要的电压跌落补偿装置,根据 LC 滤波器中滤波电容接入位置的不同,将 DVR 分为输出滤波型和电容负载并联型,2 类 DVR 的性能及其对电网的影响是不同的。对 2 类 DVR 控制系统进行了分析和设计,并在此基础上深入研究了电网阻抗对 2 类 DVR 的稳定性和系统性能的影响,比较了应用这 2 类 DVR 对电网造成的干扰并针对电容负载并联型 DVR 提出了抑制该干扰的方法。

关键词:动态电压恢复器;LC 滤波器;电网阻抗;稳定性;并联电容器
中图分类号:TN 713;TM 761　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.025

0 引言

电压跌落作为最主要的电能质量问题之一,是越来越多的敏感负载面临的主要威胁,解决该问题的一种经济有效的装置就是动态电压恢复器 DVR(Dynamic Voltage Restorer)[1-2]。DVR 主要由储能装置、变流器、滤波器和耦合装置 4 个部分组成。对于无变压器式 DVR[3-4],其耦合装置采用电容直接耦合,普遍用于低压配电系统中。

考虑滤波器结构的不同,无变压器式 DVR 可分为 2 类:输出滤波型 DVR 和电容负载并联型 DVR。输出滤波型 DVR 中,滤波电容与滤波电感构成 LC 滤波器接在逆变器的输出端[5-6];电容负载并联型 DVR 中,滤波电容采取与负载并联的接法[7-8]。针对有变压器式 DVR,目前已有文献讨论了滤波器结构不同时系统存在的差异[9-10];针对无变压器式 DVR,文献[7]和文献[8]分别对输出滤波型和电容负载并联型 DVR 进行了分析,并给出了相应的控制策略。对于无变压器式 DVR,滤波器的结构不同会对系统造成影响,然而目前尚无文献对此进行系统地分析和比较。

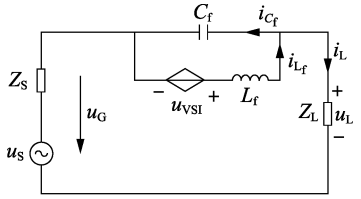
基于电网与 DVR 系统的相互影响,本文对滤波器结构不同时无变压器式 DVR 存在的差异进行了研究。考虑电网对 DVR 系统的影响时,以负载电压为研究对象,建立了 2 类 DVR 的数学模型并设计了控制系统,在此基础上,考虑电网阻抗,分析了 2 类 DVR 的稳定性和系统性能的差异;考虑 DVR 系统对电网的影响时,以电网电压为研究对象,分析了 2 类 DVR 中逆变器对电网电压造成的干扰。针对电容负载并联型 DVR 向电网倒灌高频干扰的问题,提出了电网侧并联电容的解决方案。

收稿日期:2018-04-16;**修回日期**:2018-11-22
基金项目:"大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室"开放基金资助项目(SKLLDJ022016001)
Project supported by the Foundation of State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology(SKLLDJ022016001)

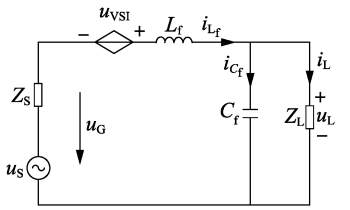
1 DVR 模型建立与控制系统设计

1.1 模型建立

输出滤波型 DVR 和电容负载并联型 DVR 的示意图如图 1 所示。图中,u_S、u_G、u_{VSI} 和 u_L 分别为理想电网电压、实际电网电压、逆变器输出电压和负载电压;i_L、i_{L_f} 和 i_{C_f} 分别为负载电流、滤波电感电流和滤波电容电流;L_f 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容;Z_S 和 Z_L 分别为电网阻抗和负载阻抗。



(a) 输出滤波型 DVR



(b) 电容负载并联型 DVR

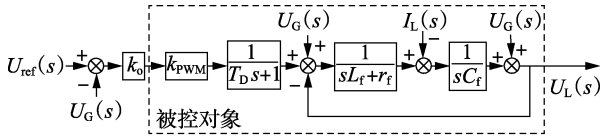
图 1 2 类 DVR 的示意图

Fig.1 Schematic diagram of two types of DVRs

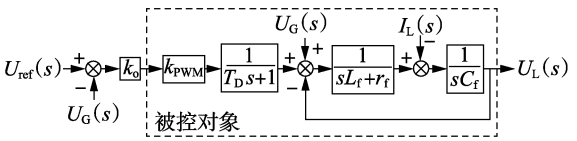
以负载电压为系统输出,不考虑电网阻抗,可得 2 类 DVR 的复频域模型如图 2 所示。图中,$U_{ref}(s)$ 为参考输入;$U_G(s)$、$U_L(s)$ 和 $I_L(s)$ 分别为 u_G、u_L 和 i_L 的复频域信号;k_o 为开环控制系数;k_{PWM} 为变流器的等效放大系数;T_D 为控制系统延时时间,取 1.5 倍的开关周期[11];r_f 为滤波电感 L_f 的等效电阻。

根据叠加原理,2 类 DVR 系统的输入输出关系均可表示为:

$$U_L(s)=G_{U_{ref}}(s)U_{ref}(s)+G_{U_G}(s)U_G(s)+G_{I_L}(s)I_L(s) \quad (1)$$



(a) 输出滤波型 DVR



(b) 电容负载并联型 DVR

图 2　2 类 DVR 的复频域模型

Fig.2　Complex frequency-domain model of two types of DVRs

其中,$G_{U_{ref}}(s)$、$G_{U_G}(s)$和$G_{I_L}(s)$分别为$U_L(s)$对$U_{ref}(s)$、$U_G(s)$和$I_L(s)$的传递函数,对于 2 类 DVR,三者是不同的。

1.2　控制系统设计

为了简化叙述,假设$G_D(s)=1/(T_D s+1)$、$G_L(s)=1/(sL_f+r_f)$、$G_C(s)=1/(sC_f)$。下文中输出滤波型 DVR 和电容负载并联型 DVR 的相关变量符号分别用上标Ⅰ和Ⅱ以区别。系统参数选取如下:$L_f=1.5$ mH,$r_f=0.1\ \Omega$,$C_f=20\ \mu$F,$T_D=100\ \mu$s,$k_{PWM}=1$。

2 类 DVR 的控制系统框图均如图 3 所示。两者均包含电感电流和负载电压双闭环,以保证系统的稳态误差要求,提高系统的抗扰性能;采用缺损电压和负载电流双前馈,以减小暂态过程中的电压和电流过冲,改善系统的动态响应[5,12-13]。控制系统中,电感电流内环控制器采用比例控制器k_C,电压外环控制器采用比例谐振控制器$G_{PR}(s)$[14-17]。设缺损电压前馈系数为k_V,负载电流前馈系数为k_I。将参考输入$U_{ref}(s)$作为系统输入,实际电网电压$U_G(s)$和负载电流$I_L(s)$作为系统扰动,则对于理想的控制系统有$G_{U_{ref}}(s)=1$、$G_{U_G}(s)=0$和$G_{I_L}(s)=0$。

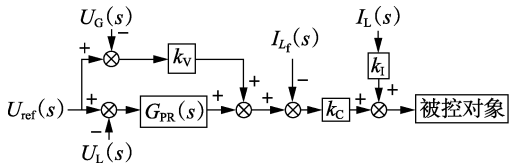


图 3　DVR 控制系统框图

Fig.3　Block diagram of DVR control system

根据图 2 和图 3,对于输出滤波型和电容负载并联型 DVR,式(1)中的 3 个传递函数分别为:

$$\begin{cases} G_{U_{ref}}^{(\mathrm{I})}(s)=\dfrac{k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C+k_V k_C k_{PWM}G_D G_L G_C}{1+G_L G_C+k_C k_{PWM}G_D G_L+k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C} \\ G_{U_G}^{(\mathrm{I})}(s)=\dfrac{1+k_C k_{PWM}G_D G_L+G_L G_C-k_V k_C k_{PWM}G_D G_L G_C}{1+G_L G_C+k_C k_{PWM}G_D G_L+k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C} \\ G_{I_L}^{(\mathrm{I})}(s)=\dfrac{k_I k_{PWM}G_D G_L G_C-G_C(1+k_C k_{PWM}G_D G_L)}{1+G_L G_C+k_C k_{PWM}G_D G_L+k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} G_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C+k_V k_C k_{PWM}G_D G_L G_C}{1+G_L G_C+k_C k_{PWM}G_D G_L+k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C} \\ G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{G_L G_C-k_V k_C k_{PWM}G_D G_L G_C}{1+G_L G_C+k_C k_{PWM}G_D G_L+k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C} \\ G_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{k_I k_{PWM}G_D G_L G_C-G_C(1+k_C k_{PWM}G_D G_L)}{1+G_L G_C+k_C k_{PWM}G_D G_L+k_C k_{PWM}G_{PR}G_D G_L G_C} \end{cases} \tag{3}$$

其中,G_{PR}、G_D、G_L和G_C分别为$G_{PR}(s)$、$G_D(s)$、$G_L(s)$和$G_C(s)$的简写。

在设计控制系统时,考虑到比例谐振控制器实际上是由比例控制器$G_P(s)=k_P$和谐振控制器$G_R(s)$并联而成,因此暂不考虑谐振控制器,先设计系统的其他参数。

在仅考虑比例控制器k_P的情况下,首先分析系统的稳定条件,由劳斯判据可得系统的稳定条件为:

$$-\frac{1}{k_C}<k_P<0.201\ 3+\frac{0.026\ 8}{k_C} \tag{4}$$

当k_C取值过小时,电流内环的开环增益不足,阻尼不够,将导致内环的抗扰性能不佳,所以k_C取值不能过小,本文取$k_C=20$。考虑到式(4),为留足稳定裕量,本文取$k_P=0.05$。对于谐振控制器,本文取截止频率为 5 rad/s,增益为 40,即:

$$G_{PR}(s)=\frac{400s}{s^2+10s+(100\pi)^2} \tag{5}$$

缺损电压前馈系数和负载电流前馈系数均可通过仿真及实验进行确定,取缺损电压前馈系数$k_V=0.001$,负载电流前馈系数$k_I=20$。

2　2 类 DVR 的分析与比较

2.1　电网阻抗对 2 类 DVR 的影响

从图 1 中可以看出,输出滤波型 DVR 的滤波器只对逆变器的输出电压(补偿电压)进行滤波,而电容负载并联型 DVR 的滤波器则是对 DVR 向负载提供的电压进行滤波。对于电容负载并联型 DVR,从滤波效果角度而言,其滤波电感与电网阻抗为串联关系,所以电网阻抗可以增强滤波器的滤波效果;从成本角度而言,当负载端并联无功补偿电容时,其可兼具滤波电容的功能,增强滤波效果,可替代滤波电容,从而可以为 DVR 节省滤波电容,降低成本。下面从稳定性和系统性能方面对 2 类 DVR 进行详细分析。

考虑电网阻抗时,由图 1—3 可得 DVR 系统的输入输出关系为:

$$U_L(s)=H_{U_{ref}}(s)U_{ref}(s)+H_{U_S}(s)U_S(s)+H_{I_L}(s)I_L(s) \tag{6}$$

其中,$U_S(s)$为理想电网电压的复频域信号;$H_{U_{ref}}(s)$、

$H_{U_S}(s)$和$H_{I_L}(s)$分别为$U_L(s)$对$U_{ref}(s)$、$U_S(s)$和$I_L(s)$的传递函数。

对于输出滤波型 DVR,有:

$$\begin{cases} H_{U_{ref}}^{(\mathrm{I})}(s)=G_{U_{ref}}^{(\mathrm{I})}(s) \\ H_{U_S}^{(\mathrm{I})}(s)=G_{U_G}^{(\mathrm{I})}(s) \\ H_{I_L}^{(\mathrm{I})}(s)=G_{I_L}^{(\mathrm{I})}(s)-G_{U_G}^{(\mathrm{I})}(s)Z_S(s) \end{cases} \tag{7}$$

对于电容负载并联型 DVR,有:

$$\begin{cases} H_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{G_C(s)G_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)}{G_C(s)+G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)Z_S(s)} \\ H_{U_S}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{G_C(s)G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)}{G_C(s)+G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)Z_S(s)} \\ H_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{G_C(s)\left[G_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)-G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)Z_S(s)\right]}{G_C(s)+G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)Z_S(s)} \end{cases} \tag{8}$$

2.1.1 稳定性分析比较

由式(7)可知,对于输出滤波型 DVR 系统,电网阻抗不会为系统引入新的极点,故电网阻抗不会影响输出滤波型 DVR 的稳定性;当 DVR 控制系统稳定时,DVR 就能稳定运行。由式(8)可知,对于电容负载并联型 DVR,电网阻抗将为系统引入新的极点,这说明电网阻抗会影响电容负载并联型 DVR 的稳定性。下面分析电网阻抗对电容负载并联型 DVR 稳定性的影响。

根据式(8),除控制系统包含的极点外,电容负载并联型 DVR 系统还包含由电网阻抗引入的极点。当 DVR 控制系统稳定时,需要分析电网阻抗引入的极点是否含不稳定极点。这些极点的引入来自于:

$$G_{ep}(s)=\frac{G_C(s)}{G_C(s)+G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)Z_S(s)} \tag{9}$$

电网阻抗对系统的影响主要是由电网的等效电感引起的,为了简化分析,忽略电网的等效电阻,取$Z_S(s)=sL_S$,则式(9)的特征方程为:

$$1+L_S\frac{G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)}{G_C(s)}s=0 \tag{10}$$

根据式(10)绘制$G_{ep}(s)$的根轨迹图,如图 4 所示。从图中可以看出,当电网等效电感L_S>2.26 mH 时,$G_{ep}(s)$的根轨迹进入复频域右半平面,表明此时$G_{ep}(s)$包含不稳定极点,则式(8)中$H_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)$、$H_{U_S}^{(\mathrm{II})}(s)$和$H_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)$亦包含不稳定极点,系统不再稳定。这说明电容负载并联型 DVR 的应用范围受电网限制,电网阻抗会为系统引入新的极点。当电网阻抗过大时,这些极点中就会含有不稳定极点,使 DVR 不能稳定运行。所以在实际应用中,DVR 的选型需要考虑电网阻抗,对于电网阻抗过大的电网(如弱电网),不能采用电容负载并联型 DVR,而应采用稳定性不受电网阻抗影响的输出滤波型 DVR。

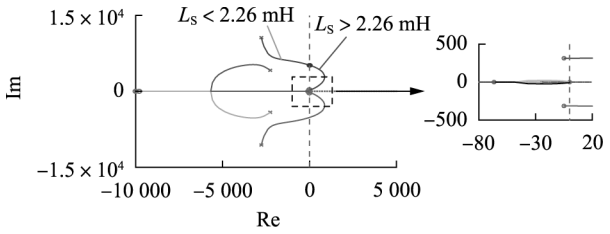
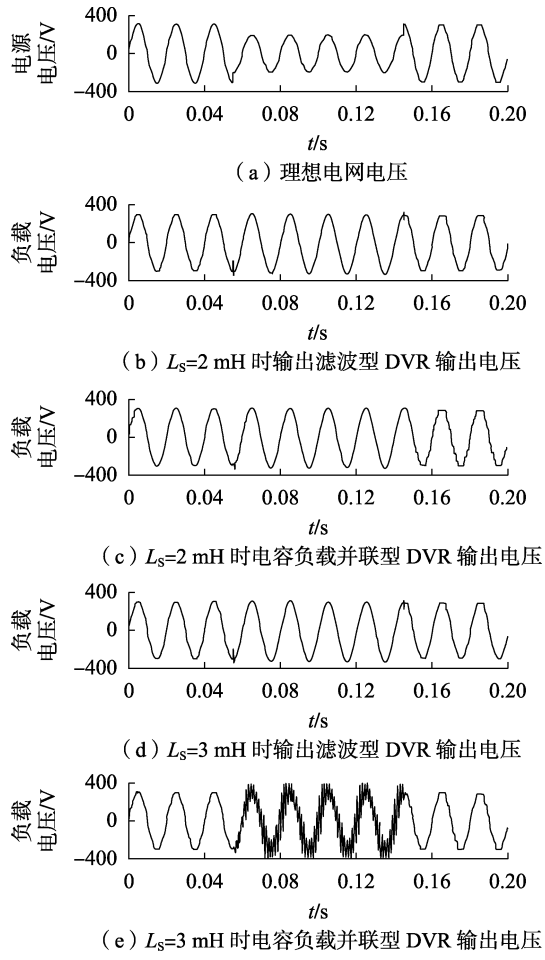


图 4 电容负载并联型 DVR 系统的根轨迹图

Fig.4 Root locus of capacitor-load-parallel DVR system

针对上述分析,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型进行验证,其中理想电网电压为 220 V/50 Hz 的交流电源,含 3、5、7 次谐波各 3%。设置 0.055 s 时发生电压跌落,0.145 s 时恢复电压,跌落深度为 35%,负载取 20 Ω 电阻和 30 mH 电感串联。当电网等效电感分别为 2 mH 和 3 mH 时,2 类 DVR 的仿真结果如图 5 所示。从图中可以看出,当电网等效电感为 2 mH 时,输出滤波型和电容负载并联型 DVR 系统都能稳定运行,输出电压分别为 220.7 V 和 220.3 V,总谐波畸变率(THD)分别为 1.97%和 1.75%;当电网等



(a) 理想电网电压

(b) L_S=2 mH 时输出滤波型 DVR 输出电压

(c) L_S=2 mH 时电容负载并联型 DVR 输出电压

(d) L_S=3 mH 时输出滤波型 DVR 输出电压

(e) L_S=3 mH 时电容负载并联型 DVR 输出电压

图 5 L_S 不同时 2 类 DVR 的仿真结果

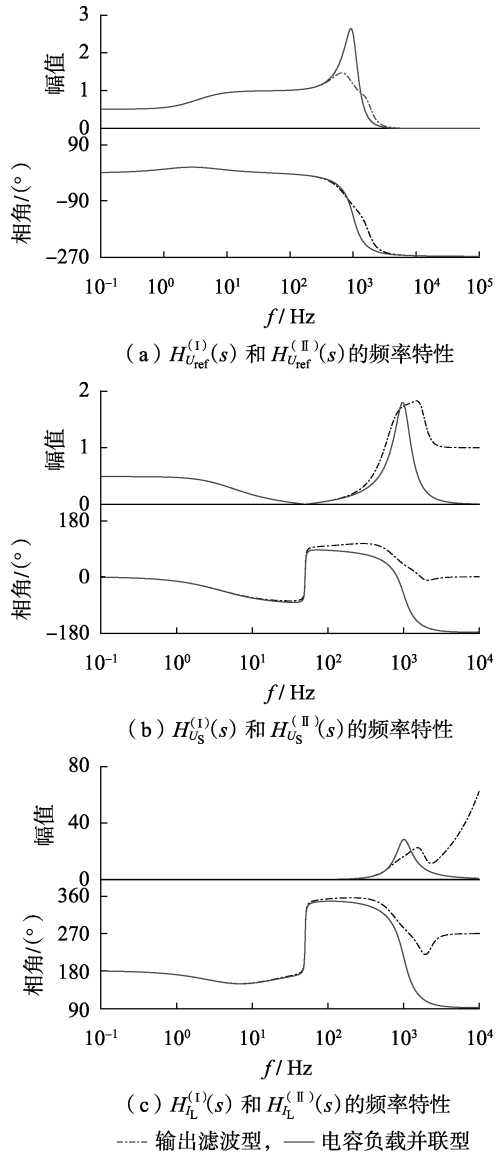
Fig.5 Simulative results of two types of DVRs with different values of L_S

效电感为 3 mH 时，输出滤波型 DVR 仍能够稳定运行，而电容负载并联型 DVR 已出现振荡现象，不再稳定。这说明当电网阻抗较小时，2 类 DVR 均能稳定运行；当电网阻抗增大时，输出滤波型 DVR 稳定性不受影响，而电容负载并联型 DVR 将可能失稳，仿真结果与上述分析结果是一致的。

2.1.2　系统性能比较

根据式(7)和(8)，设电网等效电感 $L_S = 1$ mH，等效电阻 $R_S = 0.1\ \Omega$，即电网阻抗 $Z_S(s) = 0.001s + 0.1$。绘制 2 类 DVR 系统中各传递函数的频率特性曲线，如图 6 所示。由图 6 可知，从跟踪性能来看，$H_{U_{ref}}^{(\mathrm{I})}(s)$ 和 $H_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)$ 在频率为 50 Hz 左右增益均基本为 1，带宽相对较高且基本相同，说明 2 类 DVR 对于频率为 50 Hz 左右的电网电压均能快速、稳定而精确地进行补偿，跟踪性能良好；从抗扰动性能来看，$H_{U_S}^{(\mathrm{II})}(s)$ 和 $H_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)$ 与 $H_{U_S}^{(\mathrm{I})}(s)$ 和 $H_{I_L}^{(\mathrm{I})}(s)$ 相比，高频衰减能力较强，中低频段(1 kHz 以下)衰减能力无明显差异，而一般情况下，电网和负载的扰动主要集中在中低频段，这说明电容负载并联型 DVR 比输出滤波型 DVR 的抗扰动性稍强，但差别不大；另外，对于电压相位突变和频率跳变问题，由 $H_{U_S}^{(\mathrm{I})}(s)$ 和 $H_{U_S}^{(\mathrm{II})}(s)$ 的频率响应可以看出，2 类系统对于频率为 50 Hz 左右的电网电压的响应均基本为 0，说明电压相位突变和频率跳变对 2 类 DVR 的稳态性能均不会造成明显影响。

针对上述分析，同样采用仿真进行验证。根据实际中常见的情况，针对电网电压的频率和相位跳变问题，对 2 类 DVR 进行比较。取电网电感为 1 mH，其他参数与 2.1.1 节相同。图 7(a)—(c)给出了电网电压跌落伴随频率跳变(频率从 50 Hz 跳变至 50.5 Hz)时 2 类 DVR 的补偿情况，可以看出，频率跳变对 2 类 DVR 的稳态精度基本无影响，但在瞬



(a) $H_{U_{ref}}^{(\mathrm{I})}(s)$ 和 $H_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)$ 的频率特性

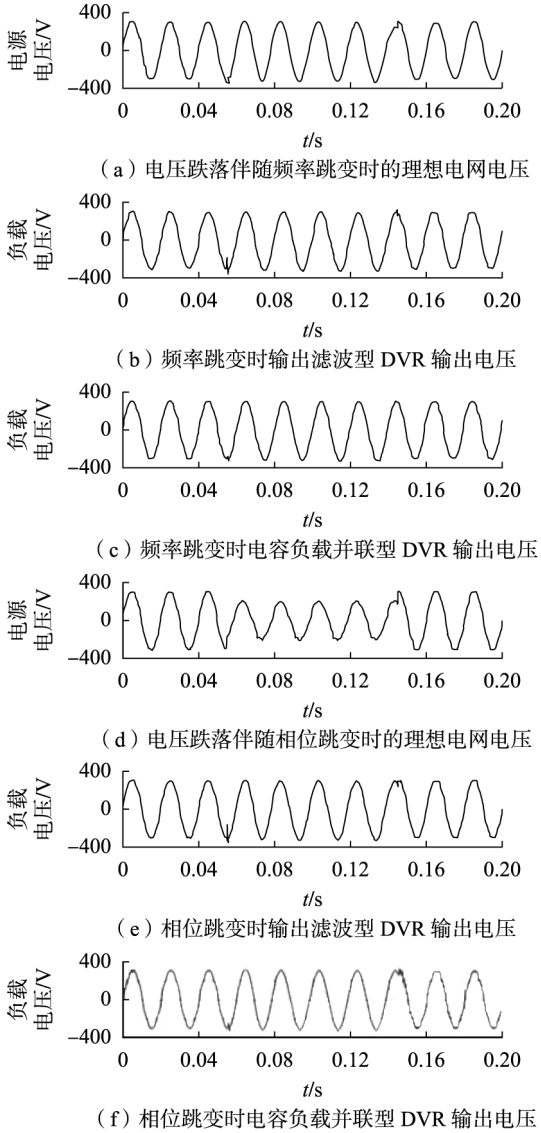
(b) $H_{U_S}^{(\mathrm{I})}(s)$ 和 $H_{U_S}^{(\mathrm{II})}(s)$ 的频率特性

(c) $H_{I_L}^{(\mathrm{I})}(s)$ 和 $H_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)$ 的频率特性

----- 输出滤波型，—— 电容负载并联型

图 6　2 类 DVR 的频率特性

Fig.6　Frequency characteristics of two types of DVRs



(a) 电压跌落伴随频率跳变时的理想电网电压

(b) 频率跳变时输出滤波型 DVR 输出电压

(c) 频率跳变时电容负载并联型 DVR 输出电压

(d) 电压跌落伴随相位跳变时的理想电网电压

(e) 相位跳变时输出滤波型 DVR 输出电压

(f) 相位跳变时电容负载并联型 DVR 输出电压

图 7　相位和频率跳变对 2 类 DVR 的影响

Fig.7　Impacts of phase and frequency jump on two types of DVRs

态过程中,电容负载并联型 DVR 的高频脉动比输出滤波型 DVR 更小,与理论分析结果一致。图 7(d)—(f)给出了电网电压跌落伴随相位跳变(相位从 270°跳变至 300°)时 2 类 DVR 的补偿情况,可以看出,相位跳变对 2 类 DVR 的稳态精度影响也非常小,而在瞬态过程中,电容负载并联型 DVR 的高频脉动也比输出滤波型 DVR 小,与理论分析结果也是一致的。

2.2 2 类 DVR 对电网的影响

从图 1 可以看出,无论是输出滤波型 DVR 还是电容负载并联型 DVR,其中的电压源均为 2 个:理想电网电压 u_S 和变流器 u_{VSI}。故研究 2 类 DVR 对电网的影响时,取电网电压(公共节点电压)$U_G(s)$ 为输出、理想电网电压 $U_S(s)$ 和逆变器输出电压 $U_{VSI}(s)$ 为输入,DVR 系统的输入输出关系为:

$$U_G(s)=G_{U_S}(s)U_S(s)+G_{U_{VSI}}(s)U_{VSI}(s) \quad (11)$$

其中,$G_{U_S}(s)$ 和 $G_{U_{VSI}}(s)$ 分别为 $U_G(s)$ 对 $U_S(s)$ 和 $U_{VSI}(s)$ 的传递函数。为简化叙述,令 $Z_{L_f}(s)=sL_f+r_f$、$Z_{C_f}(s)=1/(sC_f)$,由图 1 可得下述关系。

对于输出滤波型 DVR,有:

$$\begin{cases} G_{U_S}^{(\mathrm{I})}(s)=\dfrac{Z_{C_f}/\!/Z_{L_f}+Z_L}{Z_{C_f}/\!/Z_{L_f}+Z_L+Z_S} \\ G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{I})}(s)=-\dfrac{(Z_S+Z_L)/\!/Z_{C_f}}{(Z_S+Z_L)/\!/Z_{C_f}+Z_{L_f}}\dfrac{Z_S}{Z_S+Z_L} \end{cases} \quad (12)$$

对于电容负载并联型 DVR,有:

$$\begin{cases} G_{U_S}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{Z_{C_f}/\!/Z_L+Z_{L_f}}{Z_{C_f}/\!/Z_L+Z_{L_f}+Z_S} \\ G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{II})}(s)=-\dfrac{Z_S}{Z_{C_f}/\!/Z_L+Z_{L_f}+Z_S} \end{cases} \quad (13)$$

考虑到 DVR 对电网的影响主要是由逆变器引起的,此处仅分析 $G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{I})}(s)$ 和 $G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{II})}(s)$ 的差异,进而比较输出滤波型 DVR 和电容负载并联型 DVR 对电网造成影响的差别。

在低频段,$Z_{C_f}(s)=1/(sC_f)$ 很大,同时负载阻抗远大于电网阻抗,故 $G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{I})}(s)\approx 0$,$G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{II})}(s)\approx 0$;在高频段,$Z_{C_f}(s)=1/(sC_f)$ 很小,故 $G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{I})}(s)\approx 0$,$G_{U_{VSI}}^{(\mathrm{II})}(s)\approx -Z_S/(Z_{L_f}+Z_S)$。由于逆变器的输出电压主要包含与 PWM 波频率相同的低频分量和与开关频率相同的高频分量,所以输出滤波型 DVR 基本不会影响电网电压;而对于电容负载并联型 DVR,逆变器将向电网倒灌开关频率及其整数倍频率的高频干扰,且电网阻抗越大,倒灌高频干扰的比例越大。

针对电容负载并联型 DVR 的高频倒灌问题,一种行之有效的解决办法是在 DVR 的电网侧并联一个电容 C_{Sf},如图 8 所示。此时电容 C_{Sf} 与滤波电感 L_f 构成一个 LC 滤波器,当该滤波器的截止频率小于开关频率时,即可抑制逆变器向电网倒灌高频分量。需要注意的是,为避免谐振,电容 C_{Sf} 需串联一个阻尼电阻,即图 8 中所示的 R_{Sf}。

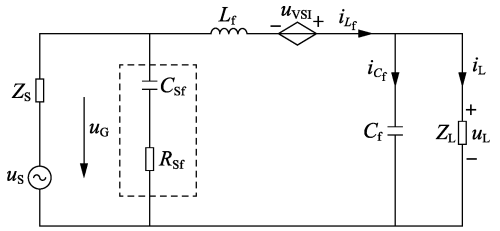


图 8 电容负载并联型 DVR 高频干扰倒灌的解决办法

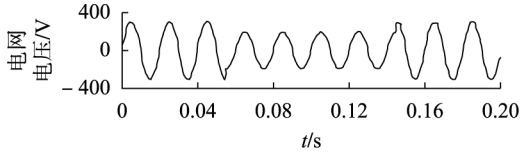
Fig.8 Solution for capacitor-load-parallel DVR to suppress high-frequency interference to grid

同时需要注意的是,电容 C_{Sf} 会对整个系统的性能和稳定性有所影响。设 $Z_{Sf}(s)=1/(sC_{Sf})+R_{Sf}$,由图 8 可得:

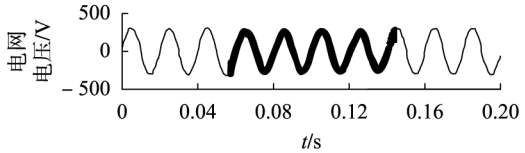
$$\begin{cases} H_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{G_C(s)G_{U_{ref}}^{(\mathrm{II})}(s)}{G_C(s)+G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)(Z_S(s)/\!/Z_{Sf}(s))} \\ H_{U_S}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{G_C(s)G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)}{G_C(s)+G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)(Z_S(s)/\!/Z_{Sf}(s))} \\ H_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)=\dfrac{G_C(s)(G_{I_L}^{(\mathrm{II})}(s)-G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)Z_S(s))}{G_C(s)+G_{U_G}^{(\mathrm{II})}(s)(Z_S(s)/\!/Z_{Sf}(s))} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)表明,该方法等效于在电网阻抗 $Z_S(s)$ 两端并联了阻容负载 $Z_{Sf}(s)$,因此,为减小该方法对系统造成的影响,电容 C_{Sf} 和阻尼电阻 R_{Sf} 的取值需要折中考虑,实际应用该方法时,可以采用仿真等手段确定其取值。

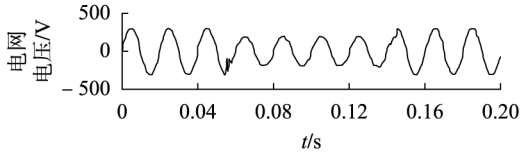
图 9(a)和图 9(b)分别为采用输出滤波型 DVR



(a) 采用输出滤波型 DVR 时的电网电压



(b) 采用电容负载并联型 DVR 时的电网电压(电网侧未并联电容)



(c) 采用电容负载并联型 DVR 时的电网电压(电网侧并联电容)

图 9 采用 2 类 DVR 时的电网电压仿真波形

Fig.9 Simulative waveforms of grid voltage with two types of DVRs

和电容负载并联型 DVR 时的电网电压仿真波形。取电网等效电感为 1 mH,其他仿真参数与 2.1.1 节相同。从图中可以明显看出,采用输出滤波型 DVR 时电网电压正常;而采用电容负载并联型 DVR 时,电网电压中出现了大量的高频分量。这表明输出滤波型 DVR 并未影响电网电压,而电容负载并联型 DVR 向电网倒灌了大量的高频干扰。图 9(c)为电网侧并联电容的仿真结果,其中取电网侧并联电容 $C_{Sf}=10\ \mu F$,阻尼电阻 $R_{Sf}=3.33\ \Omega$,可以看出,此时 DVR 向电网倒灌高频干扰已得到有效抑制,仿真结果与理论分析结果相符。

3　实验分析

针对上述设计,本文进行实验验证。考虑到系统会对电网造成影响,故实验在降低电压等级的情况下进行。实验参数如下:输出电压为 50 V/50 Hz,电网电压为 35 V/50 Hz(即跌落深度为 30%),负载为 40 Ω 电阻负载。

3.1　输出性能及高频干扰倒灌现象比较

当电网等效电感为 0.75 mH 时,2 类 DVR 的运行情况如图 10 所示。图 10 表明,2 类 DVR 都具有良好的跟踪性能,稳定且准确地补偿了电网电压。从波形质量角度来看,电容负载并联型 DVR 的波形质量稍好。同时可以看出,采用电容负载并联型 DVR 时,电网电压存在大量的高频干扰,正是由 DVR 中逆变器输出的高频分量干扰倒灌所致。

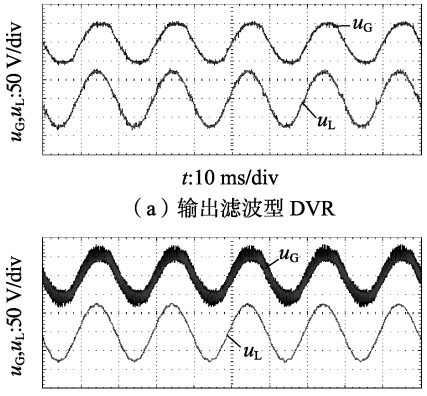


图 10　采用 2 类 DVR 时的电网电压与负载电压实验波形

Fig.10　Experimental waveforms of grid voltage and load voltage with two types of DVRs

3.2　稳定性比较

当电网等效电感为 2.75 mH 时,2 类 DVR 的运行情况如图 11 所示。图 11 表明,输出滤波型 DVR 系统仍然稳定运行,而电容负载并联型 DVR 输出电压已出现振荡现象,同时引起了电网电压的振荡,系统不再稳定。图 10 和图 11 表明,电网阻抗的增大对输出滤波型 DVR 的稳定性无明显影响,却能引起电容负载并联型 DVR 失稳。

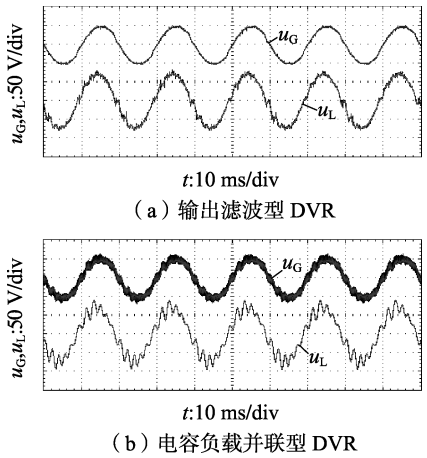


图 11　采用 2 类 DVR 时的电网电压与负载电压实验波形

Fig.11　Experimental waveforms of grid voltage and load voltage with two types of DVRs

3.3　高频干扰倒灌抑制

当电网等效电感为 0.75 mH 时,电网侧未并联电容、电网侧并联电容 2 种情况下电容负载并联型 DVR 的运行情况如图 12 所示,其中网侧并联电容为 10 μF,阻尼电阻为 3.33 Ω。图 12 表明,对于电容负载并联型 DVR,电网侧未并联电容时,电网电压中存在 DVR 向电网倒灌的大量高频干扰,而在电网侧并联电容之后,电网电压中的高频分量得到了有效抑制,说明通过在电网侧并联电容抑制 DVR 高频干扰倒灌的方法是可行的。

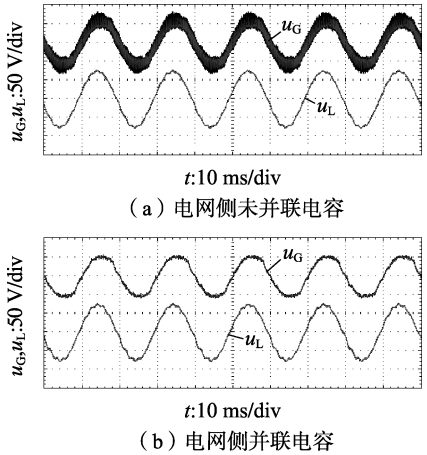


图 12　电网侧未并联电容与并联电容时的电网电压与负载电压实验波形

Fig.12　Experimental waveforms of grid voltage and load voltage with parallel capacitor unconnected and connected

4　结论

通过上述理论分析、仿真和实验验证,本文得到以下的结论。

a. 在稳定性方面,电网阻抗对输出滤波型 DVR 无影响,只要设计的控制系统是稳定的,DVR 就能

稳定运行;但对于电容负载并联型 DVR,电网阻抗的增大会降低系统的稳定性。这就意味着输出滤波型 DVR 比电容负载并联型 DVR 具有更广的应用范围,电容负载并联型 DVR 只能应用于较强的电网。

b. 在系统性能方面,系统稳定运行时,2 类 DVR 均具备良好的补偿性能,且电容负载并联型 DVR 的输出波形质量稍好。此时,对于电容负载并联型 DVR,如果负载端配备无功补偿电容,可为 DVR 节省一个滤波电容,从而降低系统成本。

c. 在对电网的影响方面,输出滤波型 DVR 对电网基本不会造成影响;但电容负载并联型 DVR 会向电网倒灌高频干扰,且电网阻抗越大,这一现象越严重。为解决电容负载并联型 DVR 的高频倒灌问题,一种行之有效的方法是在电网侧并联一个电容,该电容与滤波电感构成的 LC 滤波器将能有效抑制 DVR 向电网倒灌高频干扰。

本文的研究结果可对不同类型低压 DVR 的设计、选型和应用提供参考。

参考文献:

[1] FARHADI-KANGARLU M,BABAEI E,BLAABJERG F. A comprehensive review of dynamic voltage restorers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2017,92:136-155.

[2] 王同勋,薛禹胜,CHOI S S. 动态电压恢复器研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(9):101-107.
WANG Tongxun,XUE Yusheng,CHOI S S. The summary of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(9):101-107.

[3] 张新闻,同向前. 电容耦合型动态电压恢复器参数建模与控制[J]. 电工技术学报,2016,31(6):212-218.
ZHANG Xinwen,TONG Xiangqian. Parameters modeling and control of capacitor-coupled dynamic voltage restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(6):212-218.

[4] BRUMSICKLE W E,SCHNEIDER R S,LUCKJIFF G A,et al. Dynamic sag correctors:cost-effective industrial power line conditioning[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(1):212-217.

[5] 杨道淑,肖国春,刘敏,等. DVR 系统中无功补偿电容谐振分析及抑制[J]. 电力电容器与无功补偿,2016,37(6):17-23.
YANG Daoshu,XIAO Guochun,LIU Min,et al. Analysis and suppression on resonance of reactive power compensation capacitor in DVR system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2016,37(6):17-23.

[6] 杨金涛,乐健,刘开培,等. 一种具有双级 LC 滤波电路的动态电压调节器[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):70-75.
YANG Jintao,LE Jian,LIU Kaipei,et al. DVR with double-stage LC filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):70-75.

[7] VILATHGAMUWA D M,WIJEKOON H M. Control and analysis of a new dynamic voltage restorer circuit topology for mitigating long duration voltage sags[C]//2002 Industry Applications Conference,37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh,PA,USA:IEEE,2002:1105-1112.

[8] CHEN C,DIVAN D M. Simple topologies for single phase AC line conditioning[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1994,30(2):406-412.

[9] LI B H,CHOI S S,VILATHGAMUWA D W. Design considerations on the line-side filter used in the dynamic voltage restorer[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2001,148(1):1-7.

[10] CHOI S S,LI B H,VILATHGAMUWA D M. Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2002,17(3):857-864.

[11] 殷进军. LCL 滤波并网逆变器的数字单环控制技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
YIN Jinjun. Study on digital single-loop control scheme of grid-connected inverters with LCL filter[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2012.

[12] 黄本润,夏立,吴正国,等. 线电压补偿型动态电压恢复器的双前馈加反馈控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):61-64.
HUANG Benrun,XIA Li,WU Zhengguo,et al. Double feedforward plus feedback control strategy based on line voltage compensation for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(10):61-64.

[13] 李哲,吴正国,夏立,等. 任意负载条件下动态电压恢复器的复合谐振控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):130-138.
LI Zhe,WU Zhengguo,XIA Li,et al. Compound resonant control for dynamic voltage restorers under arbitrary load conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):130-138.

[14] SURENDRAN V,SRIKANTH V,SUBHASH J T G. Performance improvement of dynamic voltage restorer using proportional-resonant controller[C]//Power and Energy Systems Conference:Towards Sustainable Energy. Bangalore,India:IEEE,2014:1-5.

[15] 申科,王建赜,蔡兴国,等. 动态电压恢复器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):65-69.
SHEN Ke,WANG Jianze,CAI Xingguo,et al. Proportional-resonant control for dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):65-69.

[16] 吴延好,聂子玲,朱俊杰,等. PR 控制策略下的中频动态电压恢复器的研究[J]. 电力电子技术,2013,47(11):55-57.
WU Yanhao,NIE Ziling,ZHU Junjie,et al. Research on medium-frequency dynamic voltage restorer with PR control strategy[J]. Power Electronics,2013,47(11):55-57.

[17] 盖阔,安群涛,孙力. 基于多重比例谐振的动态电压恢复器谐波补偿策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):156-161.
GAI Kuo,AN Quntao,SUN Li. Harmonic compensation strategy of dynamic voltage restorer based on multiple proportional resonant[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):156-161.

作者简介:

王有云

王有云(1968—),男,甘肃和政人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为电力电子技术与电气自动化(**E-mail**:wyy@vip.163.com);

马保慧(1980—),男,甘肃景泰人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为电力电子技术与电气自动化(**E-mail**:mabh8066@163.com);

(下转第 182 页 continued on page 182)

hoven, the Netherlands: IEEE, 2015: 1-6.
[15] 汪颖,李成鑫,李国栋,等. 基于响应事件工艺参数免疫时间的设备电压暂降敏感特征识别[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):181-187.
WANG Ying, LI Chengxin, LI Guodong, et al. Sensitive characteristic identification of voltage sag based on equipment response event and process[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 181-187.
[16] 杨达,肖先勇,汪颖. 计及失效事件和严重程度不确定性的设备电压暂降失效率评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):107-111,117.
YANG Da, XIAO Xianyong, WANG Ying. Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 107-111, 117.
[17] 李春海,李华强,刘勃江. 基于过程免疫不确定性的工业用户电压暂降经济损失风险评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):136-142.
LI Chunhai, LI Huaqiang, LIU Bojiang. Risk assessment based on process immunity uncertainty for industrial customers' financial losses due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 136-142.
[18] 袁媛,吴丹岳,林焱,等. 电压暂降评估体系研究[J]. 电网技术,2010,34(6):128-133.
YUAN Yuan, WU Danyue, LIN Yan, et al. Study on assessment system of voltage sags[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 128-133.
[19] 张波. 电压暂降特征提取与扰动原因分析[D]. 北京:中国电力科学研究院,2005.
ZHANG Bo. Voltage sag feature extraction and analysis of disturbance reasons[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.

作者简介:

卢文清

卢文清(1994—),女,福建福州人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制(**E-mail**:daqing1033@163.com);

常乾坤(1985—),男,吉林公主岭人,高级工程师,博士,主要研究方向为大功率电力电子变流技术和定制电力技术;

贾东强(1986—),男,甘肃白银人,工程师,博士,主要研究方向为电能质量与智能电网技术。

Research on evaluation methods of voltage sag severity for equipment side

LU Wenqing[1], CHANG Qiankun[2], JIA Dongqiang[2], QIAN Yeniu[2], XU Yonghai[1]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: Comprehensively considering the ITIC curves, SEMI curves and the tolerance curves of sensitive equipment proposed by C4.110 working group, the influence degree function of single-phase, two-phase and three-phase voltage sag are established respectively based on the actual monotonous and continuous distribution of severity function. On this basis, the non-rectangular waveform of voltage sag is taken into consideration, and the multiple sag threshold is used to describe the improved influence degree function, then a multiple sag threshold method considering the type of voltage sag and the tolerance characteristics of equipment is proposed to evaluate the severity of voltage sag on the equipment side of the actual system, and its evaluation indices comprehensively consider the equipment tolerance curve, the voltage sag duration, magnitude, type and waveform. Case study shows the correctness of the proposed method.

Key words: voltage sag; influence degree function; voltage sag type; multiple sag threshold

(上接第174页 continued from page 174)

张厚楷(1994—),男,贵州安顺人,硕士研究生,研究方向为电能质量控制技术(**E-mail**: xixizhk_gs@stu.xjtu.edu.cn);

肖国春(1965—),男,四川华蓥人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电能质量分析与控制技术、电力电子装置设计及应用技术等(**E-mail**:xgc@mail.xjtu.edu.cn);

韩笑黎(1992—),女,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为电能质量控制技术(**E-mail**:han_xiao_li667@163.com)。

Comparison and analysis of two filter structures for low-voltage dynamic voltage restorer

WANG Youyun[1], MA Baohui[1], ZHANG Houkai[2], XIAO Guochun[2], HAN Xiaoli[2]
(1. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology, TEDRI, Tianshui 741020, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: DVR (Dynamic Voltage Restorer) is an important device to compensate voltage sag. According to the connecting points of filter capacitors in LC filters, DVR can be divided into output-filtering type and capacitor-load-parallel type. The performance of the two types of DVR and their influences on power grid are different. Based on the analysis and design of the two types of DVR control system, the influence of power grid impedance on stability and system performance of the two types of DVR are studied, the interference on power grid caused by the application of these two types of DVR are compared and the method for capacitor-load-parallel DVR to suppress the interference is proposed.

Key words: dynamic voltage restorer; LC filter; grid impedance; stability; parallel capacitor