

## 限流式动态电压恢复器及其参数设计

唐君华<sup>1</sup>, 涂春鸣<sup>1</sup>, 姜飞<sup>1</sup>, 刘子维<sup>1</sup>, 郭成<sup>2</sup>, 帅智康<sup>1</sup>

(1. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南 长沙 410082;

2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 为优化电网正常运行时的电能质量, 针对电力系统短路故障问题, 提出了一种限流式动态电压恢复器(Dynamic voltage restorer with fault current limiting, DVR-FCL)拓扑结构。以限流阻抗值为目标函数, 考虑直流侧电压整定的参数设计, 给出了 DVR-FCL 的直流侧电压、输出滤波器、串联变压器参数、串联变流器、直流侧电容的整定方法。利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件验证了 DVR-FCL 对电压跌落及短路故障的动作特性。结果表明, 所提拓扑结构和参数设计方法正确, 可实现改善电压质量和短路限流的双重功能, 保证了电力系统安全性和稳定性。

**关键词:** 短路故障; 动态电压恢复器; 限流器; LC 滤波器; 串联变压器

### Dynamic voltage restorer with current limiting function and its parameter design

TANG Junhua<sup>1</sup>, TU Chunming<sup>1</sup>, JIANG Fei<sup>1</sup>, LIU Ziwei<sup>1</sup>, GUO Cheng<sup>2</sup>, SHUAI Zhikang<sup>1</sup>

(1. Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University), Changsha 410082,

China; 2. Yunnan Electric Power Test & Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** For the voltage quality optimization under normal power operation, aiming at short-circuit fault in power system, a topology of dynamic voltage restorer with current limiting function (DVR-FCL) is proposed. A parameter design of DVR-FCL based on the objective function of current limiting impedance and the adjustment of DC voltage is introduced. The design methods of the DC link voltage, the output filter, series transformer capacity, the leakage reactance, the series converter and the DC link capacitor are analyzed in detail. The operations of DVR-FCL to voltage sag and short-circuit fault are respectively verified by PSCAD/EMTDC. Simulation results show that the proposed topology and parameters design methods are correct and reasonable, and can effectively realize the double functions of voltage quality improvement and fault current limiting. Thus, it can ensure the security and stability of power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377051).

**Key words:** short-circuit fault; dynamic voltage restorer; fault current limiter; LC filter; series transformer

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)24-0115-07

## 0 引言

随着光伏、风电等并网容量的不断扩大, 所造成的电压质量问题越来越严重<sup>[1-2]</sup>。动态电压恢复器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)作为一种串联型电力电子补偿设备, 可显著改善负载电压质量<sup>[3-4]</sup>。但是, 串联型电力电子设备对故障大电流冲击十分敏感, 故障期间 DVR 安全运行问题值得关注<sup>[5]</sup>。

短路故障限流器(Fault Current Limiter, FCL)已有深入探讨<sup>[6-7]</sup>, 但是针对其成本高昂、功能单一、

利用率低下的问题研究较少。考虑到高渗透下分布式发电系统所带来的能量流波动将引起配电网电压质量问题<sup>[8]</sup>, 因此, 研究一种具备电压补偿、短路限流的多功能动态电压恢复器具有重要现实意义。

目前, 具有限流功能的动态电压恢复器国内外已有学者进行初步研究。文献[9]提出了一种潮流计算模型反馈算法, 探讨了虚拟电感串联于配电网实现故障限流的可行性, 但这种方法对于 DVR 的补偿容量要求较高。文献[10]提出了一种 DVR 与 FCL 联合控制的电压质量调节方法, 但是电压补偿和短路限流双重功能的实现控制较为复杂, 且两者结构相对独立, 对解决 FCL 运行效率问题的作用有

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377051)

限。文献[11]提出了 DVR 快速有效补偿电压且减少故障电流为零的多环控制系统，但未提出系统电路参数设计方法。文献[12-13]分别对 DVR-FCL 的工作原理及限流滤波选型进行了细致分析，并仿真对比了不同短路类型的限流能力，但未给出 DVR-FCL 各部件参数设计方法。

本文首先介绍了一种限流式动态电压恢复器 (Dynamic voltage restorer with current limiting Function, DVR-FCL) 拓扑，具有在电网正常情况下优化电压质量，电网故障下限制短路故障电流的双重功能；其次，提出一种以限流阻抗值为目标函数，且考虑直流侧电压整定的参数设计思路，给出了 DVR-FCL 的详细设计方法。采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件验证了本文所提出参数设计方法的正确性和有效性。

## 1 DVR-FCL 拓扑及模型

### 1.1 DVR-FCL 拓扑

DVR-FCL 拓扑结构如图 1 所示。其中，三单相 H 桥整流器经滤波电感  $L_{(a,b,c)}$  和并联变压器  $T_{(1,2,3)}$  与电网实现能量交换；三单相 H 桥逆变器分别接直流储能电容  $C_{dc}$ ，经过 LC 滤波电路、串联变压器  $T_{(4,5,6)}$  串入系统。串联变流器输出侧并联小电感  $L_z$  和一组反并联晶闸管构成的限流开关支路 S。拓扑中，串联变压器及输出滤波器为补偿电压电路和限流回路所共用，变压器原边绕组串联接入电网主回路、副边经 LC 滤波器与串联变流器交流端相连接。串联变压器  $T_{(4,5,6)}$  的变比为  $k:1$ ，并联变压器  $T_{(1,2,3)}$  的变比为  $n:1$ 。

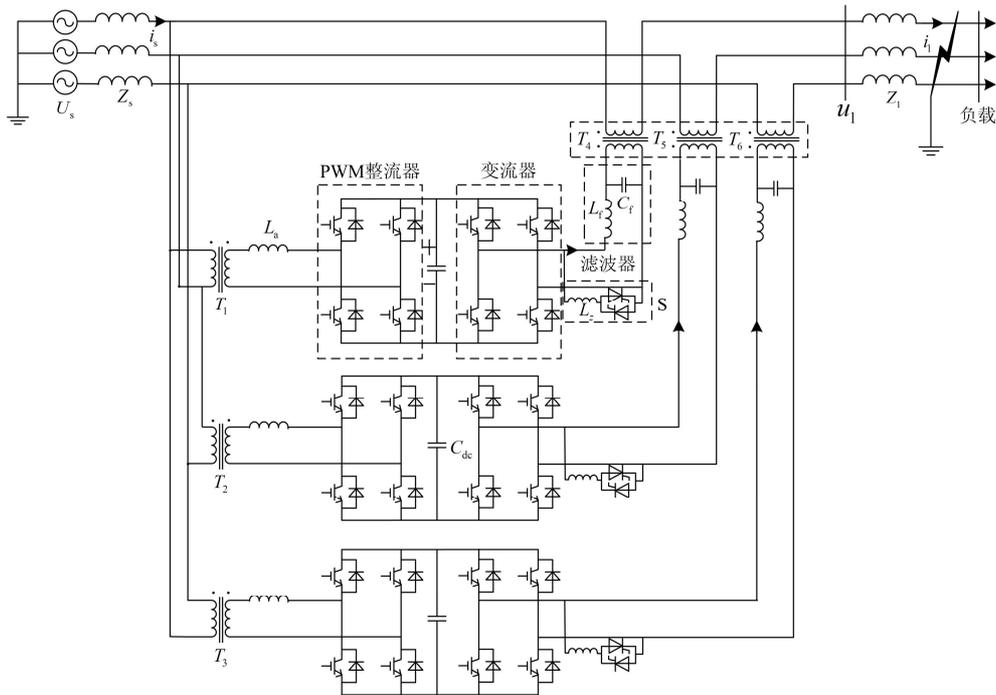


图 1 DVR-FCL 拓扑结构

Fig. 1 Topology of DVR-FCL

DVR-FCL 装置有两种工作模式：电压质量补偿模式及短路限流模式。

(1) 电压质量补偿模式。DVR-FCL 正常运行时，限流开关支路保持断开状态，PWM 整流器维持直流侧电容两端的稳定。当电压发生跌落或升高时，控制系统一旦检测到电网电压变化，瞬时控制串联变流器输出补偿电压，经串联变压器耦合至电网，实现动态电压恢复控制。

(2) 短路限流模式。负载侧发生短路时，封锁串联变流器 IGBT 的驱动脉冲，限流开关支路 S 闭合，

滤波电感通过串联变压器迅速串入故障回路抑制短路电流上升。此时，短路电流经串联变压器、滤波器、限流开关支路 S 形成一个暂态限流回路，直到系统短路故障消除。可见，等效限流阻抗大小由 LC 输出滤波器、串联变压器、限流开关支路的电感共同决定。

### 1.2 DVR-FCL 等效限流阻抗分析

短路限流工作模式下，滤波器电感和电容、限流支路电感经串联变压器串入电源电路实现短路限流，故障电流限制后的大小为

$$I'_{\text{fault}} = \frac{U_s}{Z_s + Z_{\text{lim}} + Z_1} \quad (1)$$

其中, 限流等效阻抗  $Z_{\text{eq}}$  为

$$Z_{\text{eq}} = \frac{k^2 \omega_1 L_f + Z_1 (1 - \omega_1^2 L_f C_f)}{1 - \omega_1^2 L_f C_f} \quad (2)$$

式中,  $\omega_1$  为基波频率。由于  $Z_{\text{lim}} \gg Z_s$ 、 $L_f \gg L_z$ , 则限流开关支路电感  $L_z$  和电源内阻  $Z_s$  可以忽略。DVR-FCL 的单相短路限流等效电路及其简化电路如图 2 所示。

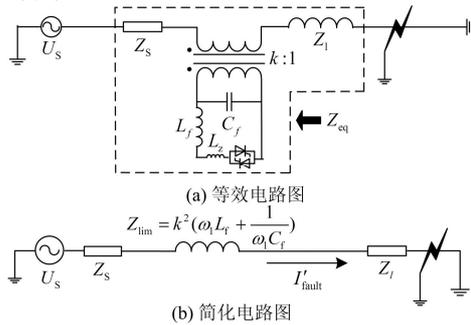


图 2 限流等效电路及简化电路图

Fig. 2 Equivalent and simplified circuit of current limiting

## 2 DVR-FCL 参数设计

考虑到 DVR-FCL 具有短路限流工作模式, 选择串联变压器和输出滤波器参数时应考虑其过流能力。此外, 直流侧电压的稳定对 DVR-FCL 系统可靠运行起着关键作用。因此, 以限流阻抗大小为目标函数, 基于直流侧电压整定的参数设计流程如图 3 所示。

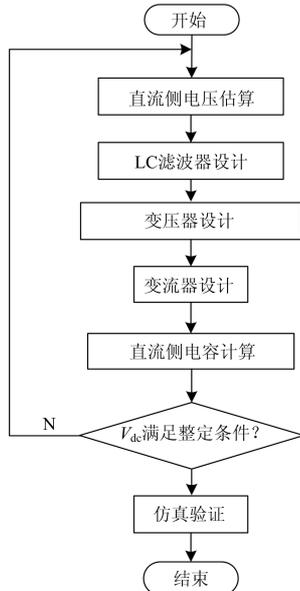


图 3 基于直流侧电压整定的参数设计流程图

Fig. 3 Parameter design flow based on the DC side voltage setting

参数设计主要思路: 首先, 通过直流侧电压预估和短路限流需求设计各部件参数, 尤其串联变压器和输出滤波器设计时, 应当考虑 DVR-FCL 的双重功能; 由直流侧电压初步确定输出滤波器的取值范围, 并采用最佳无功容量计算输出滤波电感和电容参数, 再根据限流阻抗公式, 确定串联变压器的变比、漏抗及容量; 当各部分参数计算完成后重新对直流侧电压进行反馈校验, 直到所设计参数满足整定要求。

### 2.1 直流侧电压估算

当短路故障发生, 电源电压几乎全部加在串联变压器的原边。为保证直流侧电压的稳定性及直流侧电容的安全性, 直流侧电压估算值应该高于串并联变压器二次侧电压的峰峰值。由于串并联变压器的变比尚未设定, 可预先假设直流侧电压值满足

$$V_{\text{dc}} \leq 0.65 V_{\text{CES}} \quad (3)$$

式中,  $V_{\text{CES}}$  是 IGBT 的正向阻断电压, 若采用  $V_{\text{CES}}$  为 1700V, 则直流侧电压  $V_{\text{dc}}$  可估算为 700-800V。

### 2.2 LC 滤波器参数设计

DVR-FCL 的 LC 滤波器用于滤除变流器产生的高次谐波。为防止高次谐波注入串联变压器, 降低对变压器容量的需求, 设计滤波器应当可置于串联变流器输出端。LC 滤波器等效结构如图 4 所示。

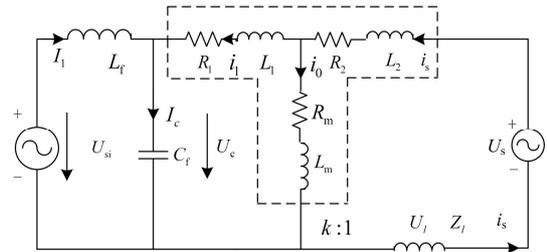


图 4 LC 滤波器的等效结构图

Fig. 4 Equivalent structure of LC filter

若设置 LC 滤波器的谐波频率为  $f_L = 1/2\pi\sqrt{L_f C_f}$ , 则有

$$C_f = \frac{1}{(2\pi f_L)^2 L_f} = \frac{1}{\omega_L^2 L_f} \quad (4)$$

直流侧变流器等效阻抗  $R_L = U_{\text{dc}}^2 / P_D$ , 其中  $P_D$  为 PWM 整流器提供的有功功率。假设阻尼系数  $\rho = \sqrt{L_f C_f}$ , 一般工程上取  $\rho = (0.5 \sim 0.8) R_L$  [14], 则

$$\begin{cases} L_f = \frac{\rho}{2\pi f_L} \\ C_f = \frac{L}{\rho^2} = \frac{1}{2\pi f_L \rho} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)得到  $L_f$ 、 $C_f$  参数取值范围, 为实现更加

理想的滤波效果, 可根据估算的直流侧电压和计算出的有功功率, 初步取得符合条件范围内的电感和电容值。设计从滤波器无功容量的角度来选择  $L_f$ 、 $C_f$  的参数。PWM 逆变器的无功容量  $Q_f$  可表示为<sup>[15]</sup>

$$Q_f = \left[ \omega_1 L_f \bar{I}_1^2 + \sum_{m=2}^{\infty} \omega_m L_f \hat{I}_{m1}^2 \right] + \left[ \omega_1 C_f \bar{U}_c^2 + \sum_{m=2}^{\infty} \omega_m C_f \hat{U}_{mc}^2 \right] \quad (6)$$

式中:  $\omega_m$  为  $m$  次谐波角频率;  $\bar{I}_1$ 、 $\bar{U}_c$  分别为电感电流和电容电压的基波有效值;  $\hat{I}_{m1}$ 、 $\hat{U}_{mc}$  为  $m$  次电感电流和电容电压的谐波有效值。逆变器输出电压的谐波分量对于基波分量是非常小的, 因此, 可简化式(6)为

$$Q_f \approx \omega_1 L_f \bar{I}_1^2 + \omega_1 C_f \bar{U}_c^2 \quad (7)$$

对于阻性负载, 有

$$\bar{I}_1 = \sqrt{\bar{I}_s^2 + (\omega_1 C_f \bar{U}_c)^2} \quad (8)$$

$$Q_f = \omega_1 L_f \bar{I}_s^2 + \left( \frac{\omega_1^3 \bar{U}_c^2}{\omega_L^4} + \frac{\omega_1 \bar{U}_c^2}{\omega_L^2} \right) \frac{1}{L_f} \quad (9)$$

若给定  $\bar{U}_c$ 、 $\bar{I}_s$  值, 就得到无功容量  $Q_f$  与电感  $L_f$  的函数, 要使  $Q_f$  最小, 可取  $\partial Q_f / \partial L_f = 0$ , 得到满足函数的电感值为

$$L_f = \sqrt{\frac{\left( \frac{\omega_1 (\bar{U}_c)^2}{\omega_L^2} + \frac{\omega_1^3 (\bar{U}_c)^2}{\omega_L^4} \right)}{\omega_1 \bar{I}_1^2}} \quad (10)$$

确定谐波频率  $f_L$  后, 则可计算出  $L_f$  和  $C_f$  具体参数。一般, 为了使滤波达到效果,  $f_L$  最好选为载波频率的 1/10~1/5。

## 2.3 串联变压器参数设计

### 2.3.1 串联变压器变比选择

电压补偿模式下, 串联变压器可将串联变流器输出电压耦合至线路, 实现电压补偿; 短路故障情况下, 可将输出滤波器等效阻抗串入主电路, 限制短路电流。从图 4 分析可知, 电网侧的等效阻抗为  $Z_{lim}$ , 假设串联变压器为理想变压器, 则二次侧等效阻抗为  $Z_{lim}/k^2$ 。阻抗匹配条件下, LC 滤波后的基波电压不衰减, 可得到

$$j\omega_L L_f + \frac{(1/j\omega_L C_f) Z_{lim}/k^2}{(1/j\omega_L C_f) + Z_{lim}/k^2} = Z_{lim}/k^2 \quad (11)$$

又谐波角频率  $\omega_L = 1/\sqrt{L_f C_f}$ , 则

$$|Z_{lim}|/k^2 = \sqrt{L_f / C_f} \quad (12)$$

因此, 滤波电感  $L_f$ 、电容  $C_f$  与串联变压器的变比关系如下

$$\begin{cases} L_f = \frac{|Z_{lim}|}{k^2 \omega_L} \\ C_f = \frac{k^2}{|Z_{lim}| \omega_L} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 滤波电感与串联变压器的变比成反比, 电容与串联变压器的变比成正比。

若额定负载电流  $I_{Lmax} = S_{LOAD}/3U_s$ ,  $S_{LOAD}$  为负载的额定容量。设三相短路电流发生时, 故障电流被限制为额定负载电流的  $\tau$  倍, 有

$$I_{SF} \approx \tau I_{Lmax} \quad (14)$$

且  $|\tau I_{Lmax}| = |U_s| / |Z_{lim} + Z_s + Z_L|$ 。若  $|Z_{lim}| \geq |Z_s| + |Z_L|$ , 可推导

$$|\tau I_{Lmax}| \approx \frac{|U_s|}{|Z_{eq}|} = \frac{|U_s|}{|k^2 \omega_L L_f \cdot \pi / (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)|} \quad (15)$$

式(15)中,  $\alpha$  为反并联晶闸管导通角。限流模式下, 变压器的变比与最大故障电流有关, 若反并联晶闸管触发后工作在完全导通状态, 即,  $\alpha = \pi/2$ , 则有  $k = \sqrt{|U_s|/\tau |I_{Lmax}| \omega_L L_f}$ 。可见, 确定变压器变比需要同时考虑 LC 滤波参数和最大故障电流值。

### 2.3.2 串联变压器漏抗选择

滤波电感可能会导致补偿电压的下降和相移, 影响 DVR-FCL 的预期效果。降低变压器漏抗和导线电阻可以减小电压幅值衰减和相移。由于变压器励磁阻抗较大, 可忽略其对电路电流的影响。通过逆变器谐波电流  $i_n$  与网侧谐波电流  $i_1$  的衰减比  $\sigma$  来选择变压器的漏抗, 有<sup>[16]</sup>

$$\sigma = \frac{i_n}{i_1} = \frac{G_{La}}{G_{Lf} + G_{Cf} + G_{La}} = \frac{1/j\omega_{sw} L_a}{1/j\omega_{sw} L_f + j\omega_{sw} C_f + 1/j\omega_{sw} L_a} = \frac{1/L_a C_f L_f}{L_f + L_a - \omega_{sw}^2} = \frac{1/r L_f^2 C_f}{(1+r)/r L_f C_f - \omega_{sw}^2} \quad (16)$$

其中,  $L_a$  是变压器的漏抗, 且

$$r = \frac{1 - \sigma}{\sigma L_f (1 - L_f C_f \omega_{sw}^2)} \quad (17)$$

式中:  $\omega_{sw}^2 = (2\pi f_{sw})^2$ ;  $f_{sw}$  是开关频率;  $r$  是漏抗  $L_a$  与滤波电感  $L_f$  之比。因此, 确定衰减比  $\sigma$  就可以确定出电感比值, 进而得到变压器的漏抗。

### 2.3.3 串联变压器容量的计算

DVR-FCL 单相等效基波电路如图 5 所示。

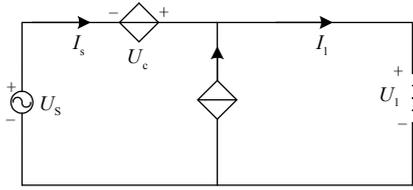


图 5 DVR-FCL 单相等效电路

Fig. 5 Single-phase equivalent circuit of DVR-FCL

串联侧输出的有功功率和无功功率分别为

$$|P_T| = |I_s U_T \cos \beta| = |I_s (U_1 \cos \delta - U_s)| \quad (18)$$

$$Q_T = I_s U_T \sin \delta \quad (19)$$

式中,  $\beta$ ,  $\delta$  分别是输出电压与负载电压的功率因数角。串联侧的容量<sup>[17]</sup>为

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = I_s \sqrt{(U_1 \cos \delta - U_s)^2 + (U_1 \sin \delta)^2} = \frac{U_1 I_1}{U_s} \cos \varphi \sqrt{U_1^2 + U_s^2 - 2U_1 U_s \cos \delta} \quad (20)$$

式中,  $\varphi$  为负载阻抗角。当电压暂降时, 取  $\varphi = \delta$ , 串联侧提供有功最小, 补偿能量也最小, 此时变压器容量为

$$S_T = \frac{U_1 I_1}{U_s} \cos \varphi \sqrt{U_1^2 + U_s^2 - 2U_1 U_s \cos \varphi} \quad (21)$$

为确保极端情况下串联变压器的安全, 设计变压器容量时应留有一定余量。

## 2.4 变流器参数设计

假设 DVR-FCL 有维持负载电压稳定的补偿功能, 当电源电压波动达到  $d\%$ , 如图 6 所示, 变流器输出电压为  $U'_o = dU_s/100k$ 。

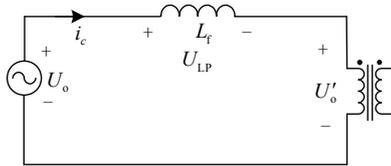


图 6 变流器等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of the converter

图 6 可知, 串联变流器的输出电压为

$$U_o = j\omega_1 k L_f \cdot i_c + U'_o \quad (22)$$

当电网运行在最大负载状态下, 逆变器输出滤波电感的电压为

$$U_{LP} = j\omega_1 k L_f \cdot I_{Lmax} = \frac{j\omega_1 k L_f S_{LOAD}}{3U_s} \quad (23)$$

额定负载情况时, 变流器的补偿电压  $U'_o$  与负载电流  $I_L$  同相, 电感电压  $U_{LP}$  滞后负载电流  $90^\circ$ 。此时, 输出电压  $U_o$  达到最大值,  $U_{omax} = MV_{dc}/2$ ,  $M$  是

变流器的调制度。

$$U'_o = \sqrt{U_{omax}^2 - U_{LP}^2} \quad (24)$$

因此, 理论额定补偿有功容量可计算为

$$P = k I_{Lmax} \sqrt{U_{omax}^2 - U_{LP}^2} \quad (25)$$

串联变流器的总容量为  $S_D = k U_{omax} I_{Lmax}$ 。

## 2.5 直流侧电容参数设计

直流侧电压的波动是随着电容的增大而变小, 但是设计的电容越大, 控制器的惯性就会越大。因此, 为保证直流侧电压的稳定性, 需要 PWM 整流器输入侧提供的有功功率比输出侧要略大。直流侧电容的参数计算须采用有功功率  $P_D$ 。假设允许的最大电压谐波率为  $\sigma_v$ , 则有

$$C_{dc} \geq \frac{P_D}{2\omega_1 \sigma_v V_{dc}^2} \quad (26)$$

## 2.6 直流侧电压的整定

直流侧电压的整定应同时满足 DVR-FCL 电压补偿和短路限流功能。由式 (24) 可知, 变流器的容量和输出电压的关系符合

$$U'_o \geq \frac{dU_s}{100k} \quad (27)$$

因此, 整定直流侧电压应该满足

$$\sqrt{\left(\frac{MV_{dc}}{\sqrt{2}}\right)^2 - \left(\frac{k\omega_1 L_f S_{LOAD}}{3U_s}\right)^2} > \frac{dU_s}{100} \quad (28)$$

同时, 为了抑制短路电流对直流侧电压的影响, 直流侧电压应满足

$$V_{dc} \geq \sqrt{2} \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot k} \quad (29)$$

如果直流侧电压的估算值不满足式 (27)-式 (29), 则需要重新整定直流侧电压, LC 滤波器参数、变压器参数、变流器及直流侧电容值都会相应的变化。

## 3 仿真实验

为了验证 DVR-FCL 功能及本文所提参数设计方法的正确性, 利用 PSCAD/EMTDC 软件分别对三相电压跌落、对称接地短路及不对称短路故障进行仿真验证。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 System parameters

参数名称	取值及单位
系统额定线电压	10 kV
串联变压器变比 $k$	10:1
并联变压器原副边之比	22.5/1
整流器输出滤波电感 $L_o$	0.9 mH
LC 滤波器电感 $L_1$	0.6 mH
限流倍数 $m$	5

以三相电压跌落为例，对 DVR-FCL 的电压补偿性能进行仿真检验。如图 7 所示，0.2~0.4 s 时，系统发生三相电压跌落，相电压相位不变且幅值均跌落至 7 kV。经过 DVR-FCL 治理后，负载电压、负载电流可维持不变，直流侧电压波动较小。可见，当系统电压发生跌落后，DVR-FCL 能够及时抑制电压跌落，保持负载电压幅值和相位基本不变。

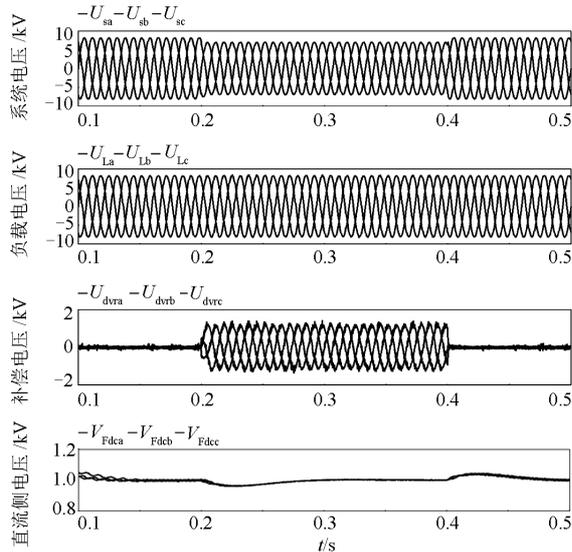


图 7 DVR-FCL 的电压补偿波形

Fig. 7 Waveforms of DVR-FCL under voltage compensations

以三相对称接地短路故障为例，对 DVR-FCL 的短路限流性能进行仿真。如图 8 所示，0.2 s 时系统发生三相对称接地短路，故障后负载侧三相电压均为零，电源三相电压均不变。故障电流迅速增大，DVR-FCL 三相均动作，迅速切换到限流模式。短路故障

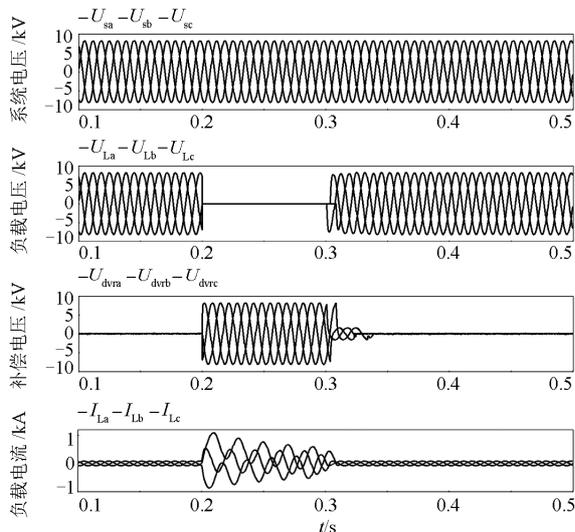


图 8 对称短路故障下 DVR-FCL 的限流波形

Fig. 8 Waveforms of DVR-FCL under symmetrical fault

消失后，DVR-FCL 能够返回到 DVR 模式，继续补偿系统电能质量。可见，系统发生三相对称短路故障时，装置能够顺利切换到短路限流模式，将短路电流限制在期望水平，不会引起过电压现象。

以不对称相间短路为例，对 DVR 的短路限流性能进行仿真。如图 9 所示，0.2 s 时系统发生不对称相间短路，故障后 bc 相负载侧电压均有跌落。故障电流迅速增大，限流器 bc 相均迅速动作切换到限流模式。短路故障消失后，DVR-FCL 能够返回到 DVR 模式。可见，系统发生不对称相间短路故障时，DVR-FCL 能够迅速切换到短路限流模式，将短路电流限制在期望水平，不会引起过电压现象。

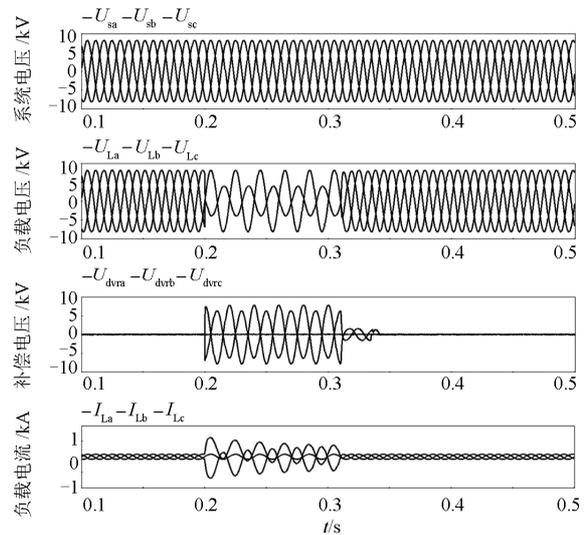


图 9 不对称短路故障下 DVR-FCL 的限流波形

Fig. 9 Waveforms of DVR-FCL under asymmetrical fault

### 4 结论

(1) 本文提出了一种限流式动态电压恢复器的拓扑结构，其具有电压补偿及短路限流双重功能。

(2) 提出了一种 DVR-FCL 的参数设计方法。以直流侧电压整定反馈设计了限流式 DVR-FCL 的滤波器参数；以低成本高性能和限流阻抗特性角度设计了串联变压器的参数；以考虑最大电流和电压稳定因素设计了变流器和直流侧电容。

(3) DVR-FCL 作为一种新型多功能装置，可实现减小电网投入成本，具有较高的推广价值。

### 参考文献

[1] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.  
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access

- points and distribution network[J]. Power Systems Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [2] 殷桂梁, 侯嘉怡. 一种低压微网中的分布式电压控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 75-80.  
YIN Guiliang, HOU Jiayi. A distributed voltage control algorithm in the low voltage microgrid[J]. Power Systems Protection and Control, 2014, 42(20): 75-80.
- [3] 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. Review of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 101-107.
- [4] 黄瀚, 杨潮, 韩英铎, 等. 配电网动态电压调节器控制策略的研究[J]. 电网技术, 2003, 26(1): 1-4.  
HUANG Han, YANG Chao, HAN Yingduo, et al. Study on control strategy of dynamic voltage restorer for distribution network[J]. Power System Technology, 2003, 26(1): 1-4.
- [5] 汤广福, 温家良, 贺之渊, 等. 大功率电力电子装置等效试验方法及其在电力系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 1-9.  
TANG Guangfu, WEN Jialiang, HE Zhiyuan, et al. Equivalent testing approach and its application in power system for high power electronics equipments[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(36): 1-9.
- [6] 陈刚, 江道灼, 吴兆麟. 固态短路限流器的研究与发展[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 89-93.  
CHEN Gang, JIANG Daozhuo, WU Zhaolin. Research and development of solid state fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 89-93.
- [7] 许逵, 孙婷, 韩松, 等. 考虑运行损耗的故障限流器补点优化和容量选择[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 22-26.  
XU Kui, SUN Ting, HAN Song, et al. Optimal sitting and parameter selection for fault current limiter constrained with power losses[J]. Power Systems Protection and Control, 2015, 43(5): 22-26.
- [8] 冯兴田, 韦统振, 齐智平. 配网中电压质量调节器的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 78-83.  
FENG Xingtian, WEI Tongzhen, QI Zhiping. Optimal allocation of voltage quality conditioner in distribution network[J]. Power Systems Protection and Control, 2012, 40(8): 78-83.
- [9] LI Y W, VILATHGAMUWA D M, LOH P C, et al. A dual-functional medium voltage level DVR to limit downstream fault currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 1330-1340.
- [10] HOSSEINI S H, ABAPOUR M, SABAHI M. A novel improved combined dynamic voltage restorer (DVR) using fault current limiter (FCL) structure[C] // Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Seoul, Korea, October, 2007: 8-11.
- [11] AJAEI F B, FARHANGI S, IRAVANI R. Fault current interruption by the dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 857-863.
- [12] 涂春鸣, 姜飞, 郭成, 等. 多功能固态限流器的现状及展望[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 146-153.  
TU Chunming, JIANG Fei, GUO Cheng, et al. Present state and perspectives of multi-function solid-state fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 146-153.
- [13] 涂春鸣, 邓树, 郭成, 等. 新型多功能固态限流器对0°接线方式的影响及其解决办法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 81-86.  
TU Chunming, DENG Shu, GUO Cheng, et al. Impact of multi-function solid state fault current limiter on 0° wiring mode and its solution method[J]. Power Systems Protection and Control, 2015, 43(4): 81-86.
- [14] KIM H, SUL S K. Analysis on output LC filters for PWM inverters[C] // IEEE 6th Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), Wuhan, May, 2009: 384-389.
- [15] 俞杨威, 金天均, 谢文涛, 等. 基于PWM逆变器的LC滤波器[J]. 机电工程, 2007, 24(5): 50-51.  
YU Yangwei, JIN Tianjun, XIE Wentao, et al. LC filter based on PWM inverter[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(5): 50-51.
- [16] 巫付专, 侯婷婷, 韩梁. 基于LCL滤波DVR补偿变压器漏抗的确定[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 126-131.  
WU Fuzhuan, HOU Tingting, HAN Liang. Determining the leakage reactance of DVR compensation transformer based on LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 126-131.
- [17] 沈虹, 万健如. 统一电能质量调节器串联注入变压器建模分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 67-72.  
SHEN Hong, WAN Jianru. Modeling analysis and design of series injection transformer in UPQC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 67-72.

收稿日期: 2015-03-05; 修回日期: 2015-04-12

作者简介:

唐君华(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: tangjunhua\_hnu@163.com

涂春鸣(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

姜飞(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: jiang85521@126.com

(编辑 张爱琴)