

基于电力电子调压器的电网综合治理控制策略

张震霄¹,赵建勇¹,年珩¹,刘小庆²,李春龙²,陈文君²,李学荣²,韩俊焱²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 国网青海省电力公司 果洛供电公司, 青海 果洛 814000)

摘要:针对稀疏地区配电网线路较长、负荷分散、分布不均易导致电网电压降落或波动,以及新能源分散式接入带来的电压降落和电网谐波问题,提出了基于电力电子调压器的电网电压综合治理控制策略,通过在三相坐标系下对串联侧补偿电压进行直接控制,实现了电网侧谐波电压的提取和补偿,提升了负载侧电压的电能质量。结合稀疏地区负载特征在Simulink中进行了仿真模型的算例验证,结果证明此方式能对电网电压中的降落进行补偿并实现谐波治理,能够有效提高稀疏地区用户的用电质量。

关键词:电力电子调压器;电网谐波电压;复系数滤波器;电压补偿

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22477

Control Strategy of Integrated Power Grid Management Based on Power Electronic Voltage Regulator

ZHANG Zhenxiao¹, ZHAO Jianyong¹, NIAN Heng¹, LIU Xiaoqing²,

LI Chunlong², CHEN Wenjun², LI Xuerong², HAN Junyao²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

2. Guoluo Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Guoluo 814000, Qinghai, China)

Abstract: Aiming at the voltage drops or fluctuations in the grid caused by long distribution network lines, scattered loads, and uneven distribution in sparse areas, as well as the voltage drops and grid harmonics problems caused by the distributed access of new energy equipment, a comprehensive control strategy was proposed for grid voltage control based on power electronic voltage regulator (PEVR). Through directly controlling the compensation voltage on the series converter in three-phase axis, the harmonic voltage on the grid side can be extracted and compensated, so the power quality of the load side was improved. The simulation model was verified in Simulink combining the load characteristics of sparse areas, the results prove that this method can compensate the drop of grid voltage and achieve harmonic voltage suppression, which can effectively improve the power quality of users in sparse areas.

Key words: power electronic voltage regulator (PEVR); grid harmonic voltage; complex coefficient filters (CCF); voltage compensation

稀疏地区指位于高原、荒漠、极寒等不适宜人类生产生活的地区,其主要特点是人口密度小、分布分散、用电量较少。其中,青海省果洛藏族自治州就是西部稀疏供电地区的典型代表之一。

果洛地区电源少,负荷分散,配电网供电线路长,若不采取适当的电压补偿装置,线路末端

电压水平会产生降落。此外,青海地区安装了较多新能源发电装置,如光伏和风电,这些分布式新能源发电装置的并网伴随着大量电力电子设备的高密度接入^[1]以及电力系统中存在的非线性元件,使得在西部稀疏供电地区的电网中还可能

存在谐波电压。而电网系统中的电压降落以及

基金项目:国网青海省电力公司科技项目(5228201900G5)

作者简介:张震霄(1998—),男,硕士研究生,Email:22010001@zju.edu.cn

谐波电压问题若得不到及时的抑制和补偿,就会影响系统运行,甚至可能导致负荷侧设备故障、区域内停电。

因此需要针对电网电压的降落和其中包含的谐波电压分量制定相应的谐波控制抑制措施。通过安装特定的调压设备来实现中低压配电网中谐波电压分量的补偿治理,以期获得用户负载侧较高的电能质量。传统的电压谐波治理设备有源滤波器(active power filters, APF)通过检测谐波源负荷馈线谐波电流,并控制APF注入等幅反相的谐波,以形成电流抵消^[2-3],由于其只能实现谐波源侧点对点的谐波治理,导致应用受限。目前柔性交流输电技术(flexible AC transmission systems, FACTS)发展迅速^[4],FACTS设备包括静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)和统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)^[5-8],可以实现电压的连续调节,并且除电压控制以外还能进行对潮流的控制,但其应用场合大多为高压、特高压直流输电等主网建设,对于稀疏地区中低压配网不太适用。统一电能质量控制器(unified power quality controller, UPQC)是目前开展研究较多的一种综合电能质量补偿装置,可以实现面向用户的电能质量综合提升^[9-10]。UPQC复合了诸多治理电能质量问题的设备,但在一般场合下不会同时关心多种电能质量问题,当面临的主要电能质量问题来自于电网电压谐波和电压降落时,UPQC的电能质量治理功能不能得到充分应用。电力电子调压器(power electronic voltage regulator, PEVR)可以弥补前述设备的缺点,作为稀疏配电网中电网电压综合治理的有效补充。

因此,本文针对稀疏地区新能源分布式接入以及配电网线路较长、负荷分散且分布不均所带来的电网电压谐波、畸变和电压降落等问题,采用PEVR参与稀疏地区中低压配网电压综合治理,从而改善用户用电质量的方法。

1 PEVR结构与原理

PEVR是一种适用于6 kV, 10 kV, 35 kV配电网的调压装置,通过电压的实时反馈实现电压的连续调节。PEVR结构图如图1所示。

PEVR串并联侧换流器通过背靠背的形式由直流电容耦合在一起,两侧换流器均采用全控型

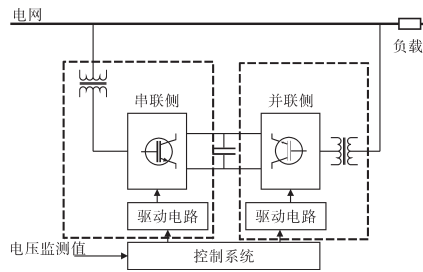


图1 PEVR结构图

Fig.1 PEVR structure diagram

器件(GTO或IGBT)。PEVR串联侧的功能与SSSC相同^[11-12],通过电压逆变器产生功率补偿,等效为在电网到用户负荷的线路上串联进一个可控的电压源,为系统叠加一个幅值、相角以及频率均可调节的交流电压。PEVR并联侧功能与STATCOM相同^[13-14],通过并联变压器对电网侧电压进行整流建立背靠背换流器直流母线电压。PEVR通过串并联侧换流器的结合,增大了原本元件单独工作时电压的调节范围。由于PEVR自身不能产生有功功率,串联侧向系统提供或吸收的有功功率是由并联侧提供通路,串并联侧逆变器之间耦合的直流电容输送,而无功功率由串并联侧逆变器提供。控制系统接收节点电压实时监测值,其补偿量由系统设置控制的参考值与实际值的差值经串并联侧内部控制环运算后反馈至系统。

PEVR选择了串联侧换流器接在靠近电网侧,而并联侧换流器接在靠近用户负载侧,这样的拓扑结构相比于串联侧接在负载侧、并联侧接在网侧的拓扑,可以在对系统功率零吸收的情况下实现电压的补偿,并为负载电压和系统电流提供更好的谐波抑制能力^[15]。

PEVR的并联侧等效补偿电流和串联侧等效补偿电压的相角均可实现 $0\sim 2\pi$ 全相角的调节,体现在功率坐标系中,即PEVR可以实现四象限运行的能力。PEVR的调节范围广,但因有串联部分接入电网,所以在发生短路等过电流情况时容易击穿设备元件,因此在投运时需进行限流控制及采取保护措施,对控制系统要求较高。

2 PEVR串并联侧控制策略

在偏远地区,大部分新能源设备与分散负荷呈现逆向分布的特性,此时新能源的接入可能会造成电网电压的不平衡以及谐波等电能质量问题,需要通过改进型锁相环(phase locked loop, PLL)^[16]获得精确的电网相位信息。PEVR的串联

侧通过给定三相正弦电压波形的参考值与负载侧电压监测实际值做差,得到需要由串联侧补偿的电压量,通过控制环消除差值,从而实现负载侧电能质量的提升。PEVR的并联侧能够实现直流母线电容降压的功能,并维持其电压值相对稳定,这是PEVR串联侧正常工作的前提。

2.1 电网基频分量提取

当电网电压畸变时,电压波形中除基频分量外还会含有一定量的谐波分量,若直接对检测得到的电网电压进行锁相,得出的角度会受到谐波的干扰而不够准确,本文使用了一种复系数滤波器(complex coefficient filters, CCF),将三相电压变换到两相静止 α - β 坐标系中,然后利用坐标轴互差 90° 的特性,实现如下式所示的复系数传递函数:

$$G(s) = \frac{\omega_c}{s \pm j\omega_0 + \omega_c} \quad (1)$$

式中: ω_0 为带通频率,一般设为电网频率或 n 次谐波频率; ω_c 为常数,决定了滤波器的带宽。

当分母取 $s-j\omega_0+\omega_c$ 时,可以从中提取出基频的电压分量。

通过复系数滤波器可以实现在选择频率处保持信号的单位增益和零相位偏移,且在其他频段范围内有大幅衰减,从而将正序50 Hz的基频分量从含有电压畸变谐波分量的网侧电压中提取出来。利用提取出来的电网分量,可以由锁相环得到精确的网侧电压的电角度,并作为输出波形的参考量。复系数滤波器结构如图2所示。

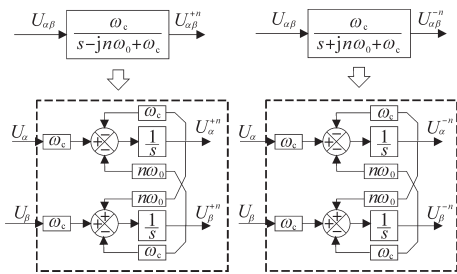


图2 复系数滤波器结构图

Fig.2 CCF structure diagram

相比于实系数滤波器,CCF同时具有频率选择和极性选择特性,在对电网电压进行锁相同步时,不仅能排除谐波电压的干扰,也能在电网电压受扰动而发生不平衡时准确得到电压、相位信息。

2.2 PEVR串联侧谐波电压检测与补偿

电网电压通过CCF提取出来的基频50 Hz分量是三相对称的正弦波形,但由于实际电网电压

可能受不平衡、谐波以及电压暂降影响,其基频分量的幅值并不等于期望的负载侧电压幅值,在控制中需要对提取出来的电压基频分量进行幅值标准化的处理。先将基频分量除以自身的有效值做归一化处理,再通过比例运算得到幅值等于线路额定值、相位与电网电压基频分量同步的正弦波形,即负载侧期望得到的电压 U_{abc}^{ref} 。

PEVR的串联侧控制方法如下式所示:

$$U_{abc}^* = U_{abc}^{ref} - U_{abc-load} \quad (2)$$

式中: U_{abc}^* 为串联侧变压器产生的电压补偿量基值; U_{abc}^{ref} 为负载侧的目标电压值; $U_{abc-load}$ 为实际负载侧采集的电压值。

当电网电压中包含5次谐波时,得到的补偿量基值 U_{abc}^* 即为5次谐波的电压波形,通过比例积分(proportional integral, PI)控制器将 U_{abc}^* 的有效值控制为0,此时串联变压器能够输出一个幅值与电网电压 $U_{abc-grid}$ 包含的谐波电压相同、相位相差 180° 的电压补偿量 $U_{abc-comp}$,对电网电压中的谐波电压进行补偿,即

$$U_{abc-grid} + U_{abc-comp} = U_{abc-load} \approx U_{abc}^{ref} \quad (3)$$

当PI控制器将 U_{abc}^* 的有效值控制为0时,通过串联侧的补偿电压量 $U_{abc-comp}$ 使负载侧电压 $U_{abc-load}$ 等于负载侧的目标电压 U_{abc}^{ref} ,实现了负载侧电压电能质量的提升。

串联侧谐波电压补偿控制框图如图3所示。通过直接在三相 a - b - c 坐标系下将从电网电压中提取并做幅值标准化后的目标电压值与负载侧采样得到的实际电压值相减得到串联侧补偿电压量的控制方法,充分利用了PEVR的串联侧通过串联变压器接入电网线路中所发挥的可控电压源的作用,对电网侧的谐波电压进行实时检测与补偿,保证了负载侧的电能质量。

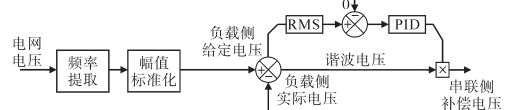


图3 串联侧谐波电压补偿控制框图

Fig.3 Block diagram of harmonic voltage compensation in series converter

此外,通过差值控制方法还能够实现电压暂降的补偿。当电网电压发生降落时,电网电压中虽然不包含谐波分量,但由于提取出的基频分量还需要做幅值标准化,此时负载侧的目标电压值与实际值的差值即频率为50 Hz。幅值为电压暂降量的正弦波,通过控制逻辑最终使串联

侧输出一个与电网电压相位相同的同频电压补偿电网电压的降落量。

2.3 PEVR 并联侧矢量控制策略

PEVR 并联侧采用电压、电流双环PI控制结构,电流内环由直流母线电容电压的设定值和并联侧换流器发出或吸收的无功功率值生成电流参考值 I_d^{ref} 和 I_q^{ref} ,通过PI控制并调制后得出电压外环输出信号 M_d 和 M_q 经过调制后作为换流器的开关信号。

由于网侧变流器需维持直流电容电压的稳定,因此其在矢量控制中的有功轴电流指令可表示为

$$i_d^{ref} = k_{vp} \cdot (U_{dc}^{ref} - U_{dc}) + k_{vi} \cdot \int (U_{dc}^{ref} - U_{dc}) \quad (4)$$

式中: U_{dc}^{ref} 为直流母线电容电压的给定值; k_{vp}, k_{vi} 分别为直流电压控制器的比例、积分系数。

在实际应用中,由于并联侧的相位角 θ 根据电网基频电压锁相得到,利用 θ 坐标变换得到的旋转坐标系下电压 $U_q=0$,故当给定变流器输出无功功率指令时,其 q 轴电流参考值由下式计算可得:

$$i_q^{ref} = Q^{ref} / U_d \quad (5)$$

若令网侧变流器保持单位功率因数运行,即要求无功功率保持为零,则 $i_q^{ref} = 0$ 。

并联侧控制框图如图4所示。通过并联侧换流器的电压-电流双闭环控制生成 $d-q$ 坐标系下的电压输出量 M_d, M_q ,再经过调制后产生换流器开关信号就可以实现对电网电压的PWM整流,得到稳定的直流母线电容电压 U_{dc} ,并为串联侧换流器实现电压补偿提供所需要的功率通路。

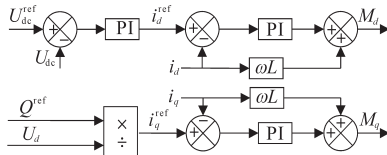


图4 并联侧控制框图

Fig.4 Block diagram of shunt converter

3 Simulink 仿真验证

稀疏地区面临的电网电压问题主要是电压降落和谐波问题。图5展示了针对稀疏地区负荷特征的电网电压综合治理模型的结构,由于输配电线路较长,考虑较大的线路阻抗时,负载侧功率的突变会造成电网电压降落的问题;电网电压中的谐波问题主要来自两方面:一方面由于偏远地区新能源并网所带来的网侧电压谐波;另一方面由于负载侧存在部分非线性负载,引入了谐波

电流,从而产生了谐波电压问题。

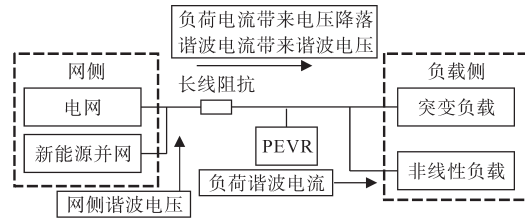


图5 稀疏地区基于PEVR的电网电压综合治理结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the comprehensive management structure of grid voltage based on PEVR in sparse areas

为了验证本文所提到的电网电压综合治理控制策略,搭建了基于Simulink软件的仿真模型。仿真模型系统电压等级为10 kV,网侧由三相电压源与长线阻抗串联得到,线路阻抗的参数设定为:线路长度120 km, $R=0.45 \Omega/\text{km}$, $X=0.358 \Omega/\text{km}$ (LGJ, LJ-70)。负载侧包含正常负载、不定时投入的大功率负载以及引起负载侧谐波电流的非线性负载模块。并联侧变压器采用三个单相变压器连接,变比为10:0.38,串联侧变压器采用Y-Y连接,变比为10:0.38,其他相关参数如下所示:串联侧滤波电路 $L_1=1 \text{ mH}$, $C_1=200 \mu\text{F}$;并联侧滤波电路 $L_2=1 \text{ mH}$, $C_2=100 \mu\text{F}$;直流母线电容电压 $U_{dc}=650 \text{ V}$; CCF 带宽频率 $\omega_c=20.93 \text{ rad/s}$;电容电压控制环 $k_{vp}=12, k_{vi}=35$;并联侧电流内环 $k_p=9, k_i=0.06$;串联侧电压补偿 $k_{pp}=1, k_{ii}=5$;直流母线电容 $C_{dc}=0.25 \text{ F}$ 。

3.1 算例1:电网电压降落补偿

当电网电压中不含谐波分量,负载侧的功率设定为400 kW时,PEVR对于电压降落的补偿如图6所示。

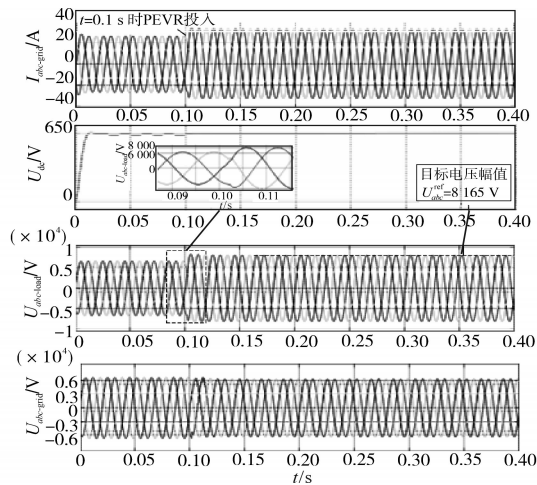


图6 电压降落补偿

Fig.6 Voltage drop compensation

在0~0.1 s间PEVR的串联侧变压器被短路,

电压调节功能未启用; $t=0.1$ s时,将原本串联变压器高压侧短路线路做开路处理,PEVR串联侧开始进行电压降落的补偿。

由图6可知,在开始阶段PEVR串联侧被短路,不能进行电压降落的调节和补偿时,网侧端口电压 $U_{abc-grid}$ 由于负载侧电流流过长线阻抗产生明显的电压降落,负载侧电压由于没有进行相应的补偿措施与网侧端口电压相同。电压降落将会严重影响负载侧用电,甚至导致系统出现稳定性风险。在 $t=0.1$ s时刻,PEVR投入使用,串联侧换流器开始工作,直流母线电容电压迅速建立并稳定在指令值650 V,网测电流 $I_{abc-grid}$ 随着并联侧换流器开始吸收功率而略微增大。PEVR的串联侧迅速对电网电压降落进行补偿,可以看到在1个周波内就基本实现了电压降落的补偿。负载侧基波电压幅值由补偿前的6 297 V补偿至7 998 V,跌落率由22.88%降低为2.04%,电压降落补偿效果良好。以下通过三个算例验证了PEVR对于电网来自电网侧和负载侧谐波问题的补偿。

3.2 算例2:电网电压5次、7次谐波补偿

当负载侧的非线性负载模块投入使用,将会给系统引入较大的5次、7次谐波电流,负载侧的谐波电流流经长线阻抗产生谐波电压。图7展示了经过PEVR控制的由负载侧谐波电流引起的谐波电压补偿前、后的波形对比。

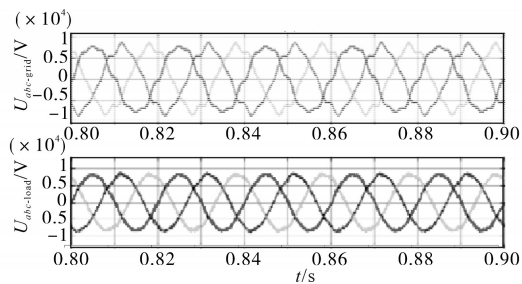


图7 算例2电压补偿前、后波形对比
Fig.7 Comparison between waveforms before and after voltage compensation in example 2

从图7中可以看到,网侧电压由于谐波电流产生了5次、7次的电压谐波,在负载侧通过PEVR的补偿消除了电网侧电压的畸变。通过分析补偿前后波形中的总谐波失真(total harmonic distortion, THD)来量化PEVR的电网电压谐波治理对于用户负载侧电能质量的提升,通过Simulink的FFT分析功能可以得到表1所示的补偿前、后即网侧端口电压 $U_{abc-grid}$ 和负载侧电压的 $U_{abc-load}$ 傅里叶分析结果。其中,5次、7次电压谐波分量表示的是谐波电压幅值与基波电压幅值的比例。

从表1可以看到,经过PEVR的补偿,网侧电压在正常负载电流下的电压降落和谐波电流引起的5次、7次谐波电压都得到了补偿。

表1 算例2补偿前、后波形傅里叶分析结果

Tab.1 FFT analyses of waveforms before and after compensation in example 2

FFT分析结果	$U_{abc-grid}$	$U_{abc-load}$
基波电压幅值/V	7 865	8 148
5次电压谐波分量/%	6.22	1.41
7次电压谐波分量/%	6.66	1.60
THD/%	9.30	4.30

3.3 算例3:电网电压的11次、13次谐波补偿

在电网电压的基频分量上附加11次负序谐波电压和13次正序谐波电压分量,模拟电网侧由于新能源并网给系统带来的谐波电压。图8展示了经过PEVR控制补偿后的负载侧电压与原本网侧电压的波形对比。

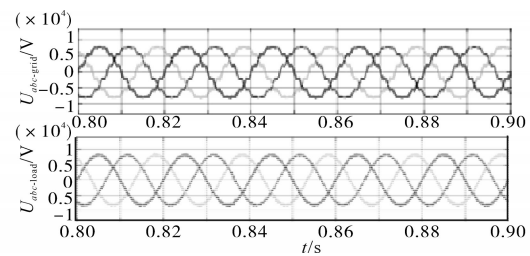


图8 算例3电压补偿前、后波形对比

Fig.8 Comparison between waveforms before and after voltage compensation in example 3

由于电网侧产生的11次、13次谐波电压也得到了补偿,负载侧的电能质量得到了提升。补偿前后电压波形经过FFT分析后得到结果如表2所示。

表2 算例3补偿前、后波形傅里叶分析结果

Tab.2 FFT analyses of waveforms before and after compensation in example 3

FFT分析结果	$U_{abc-grid}$	$U_{abc-load}$
基波电压幅值/V	7 965	8 151
11次电压谐波分量/%	5.14	0.36
13次电压谐波分量/%	5.13	0.50
THD/%	7.73	3.98

3.4 算例4:电网电压暂降以及复合谐波补偿

当电网侧和负载侧同时出现谐波问题,网侧电压基频分量上附加初始相位非零的11次、13次谐波,同时负载侧非线性负载模块投入产生相应的谐波电流,从而在网侧生成5次、7次电压谐波。并且由于负荷电流在线路阻抗上的压降,网侧电压也有一定的跌落。通过PEVR对上述复合电网电压问题进行补偿的前、后波形对比

如图9所示。

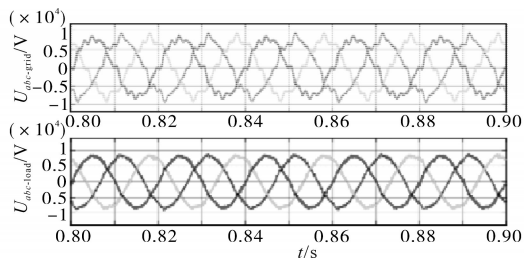


图9 算例4电压补偿前、后波形对比

Fig.9 Comparison between waveforms before and after voltage compensation in example 4

由图9可知,在双侧产生复合谐波电压造成电网畸变问题和长线路阻抗带来电压降落问题的情况下,PEVR依然能够很好地对电网中畸变的谐波电压分量进行补偿,并补偿相应的电压跌落量。补偿前、后电压波形经过FFT分析后得到结果如表3所示。

表3 算例4补偿前、后波形傅里叶分析结果

Tab.3 FFT analyses of waveforms before and after compensation in example 4

FFT分析结果	$U_{abc-grid}$	$U_{abc-load}$
基波电压幅值/V	7 863	8 150
5次电压谐波分量/%	6.15	1.69
7次电压谐波分量/%	6.54	2.30
11次电压谐波分量/%	5.21	0.49
13次电压谐波分量/%	5.21	0.71
THD/%	11.87	5.55

由表3可以看到,各次谐波电压分量都得到了较好的抑制和补偿,基波电压降落也得到了补偿,THD由11.87%下降至5.55%,补偿后电压波形THD仍然较高主要是由于换流器工作所带来的高频谐波分量。

4 结论

本文针对稀疏地区中低压配网线路长、负荷分散且波动大、新能源大量分布式接入及存在非线性负载所带来的电网电压降落和谐波含量较高的问题,提出了基于PEVR电压谐波综合治理的控制策略,使负载侧电压的电能质量得到了显著的提升。这种控制策略不需要在两相坐标系下进行运算,省去了坐标变换的步骤,并且在针对电网电压中包含复合谐波电压的情况时,不需要额外的控制方法,通过将不同频率的谐波电压统一反映在负载侧实际值与目标值之差的串联侧补偿基值中,从而消除了电网电压的谐波和畸变。

通过算例分析可知,PEVR通过串并联侧的控制方案,在没有外接储能电源的情况下,实现了利用电网能量进行电网电压综合治理的目标。针对稀疏地区的负荷特征和实际情况,PEVR对长线路配网中功率负荷投入造成电网电压降落的情况下,维持负载侧电压幅值以及针对来自电网侧和负载侧带来的谐波电压能够进行综合治理。通过PEVR调节后,负载侧电压电能质量得到提升。相比于传统调压装置,PEVR调节范围更广、速度更快、更灵活。由此可以看出,相比于其他调压设备,PEVR更适用于稀疏地区电网电压降落和谐波的综合治理,从而延长供电半径,是提高偏远地区用户电能质量的有效措施。

参考文献

- [1] 徐潜,唐凌云,李西. 新能源发电并网对电网电能质量的影响[J]. 集成电路应用,2020,37(9):138-139.
Xu Qian, Tang Lingyun, Li Xi. The impact of new energy generation and grid connection on power quality of power grid[J]. Applications of IC, 2020, 37(9): 138-139.
- [2] Chen Baifeng, Zha Xiaoming, Gong Jinwu, et al. Realization and improvement of repetitive control in rotating frame for active power filter system[C]//2010 Twenty-fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010:887-894.
- [3] 张晓滨,黄佳敏,伍文俊,等. 弱电网条件下的有源电力滤波器无锁相环控制[J]. 电气传动,2019,49(2):16-22.
Zhang Xiaobin, Huang Jiamin, Wu Wenjun, et al. Active power filter control strategy without phase-locked loop under weak grid condition[J]. Electric Drive, 2019, 49(2): 16-22.
- [4] 王仲鸿,沈斐,吴铁铮. FACTS技术研究现状及其在中国的应用与发展[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):1-5,70.
Wang Zhonghong, Shen Fei, Wu Tiezheng. Facts applications in China and its developing trends[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 1-5, 70.
- [5] 刘国静,祁万春,黄俊辉,等. 统一潮流控制器研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(12):78-86.
Liu Guojing, Qi Wanchun, Huang Junhui, et al. Review of researches on unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 78-86.
- [6] Waghmare V, Salvi A S. Industrial purposed advance controlling strategy for SVC compensator firing system using microprocessor[C]//2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), IEEE, 2017:686-689.
- [7] 周玲,王宽,钱科军,等. 计及UPFC的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报,2008,28(4):37-41.
Zhou Ling, Wang Kuan, Qian Kejun, et al. Power system reactive power optimization considering UPFC installation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 37-41.

- [8] Bindeshwar Singh, Rajesh Kumar. A comprehensive survey on enhancement of system performances by using different types of FACTS controllers in power systems with static and realistic load models[J]. Energy Reports, 2020, 6: 55-79.
- [9] 程启明, 胡晓青, 吴凯, 等. 统一电能质量调节器的谐波检测与补偿策略研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(3): 19-23.
Cheng Qiming, Hu Xiaoping, Wu Kai, *et al.* The research of harmonic detection and control strategy for unified power quality conditioner[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(3): 19-23.
- [10] 殷少奇, 白树忠. 一种基于空间矢量的恒频滞环 UPQC 控制策略[J]. 电气传动, 2014, 44(5): 67-71.
Yin Shaoqi, Bai Shuzhong. A control strategy of constant frequency hysteresis UPQC based on space vector[J]. Electric Drive, 2014, 44(5): 67-71.
- [11] Dosoglu M Kenan. Investigation with TCSC, SSSC and UPFC of static voltage stability in zip load modeling[J]. Mugla Journal of Science and Technology, 2018, 2: 15-23.
- [12] 王忠诚. 输电线路静止同步串联补偿器(SSSC)的仿真研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
Wang Zhongcheng. Simulation research on static synchronous series compensator (SSSC) in transmission lines[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [13] 肖文静, 李杰, 王应芬, 等. 基于 STATCOM 的无功补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 24-29.
Xiao Wenjing, Li Jie, Wang Yingfen, *et al.* Study on reactive power compensation strategy based on STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 24-29.
- [14] 姬煜轲, 李春华, 赵晓斌, 等. 一种改进的 STATCOM 暂态无功控制策略[J]. 南方电网技术, 2019, 13(5): 50-57.
Ji Yuke, Li Chunhua, Zhao Xiaobin, *et al.* An improved STATCOM transient reactive power control strategy[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(5): 50-57.
- [15] Mohamed B S, Ibrahim Rosdiazli, Rama Rao K S, *et al.* Performance evaluation of R-UPQC and L-UPQC based on a novel voltage imperfections detection algorithm[J]. International Review of Electrical Engineering, 2013, 8(4): 167-172.
- [16] 胡彬, 吴超, 年珩, 等. 薄弱电网下新能源设备并网锁相同步方式综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 26-34, 41.
Hu Bin, Wu Chao, Nian Heng, *et al.* Summarization of grid-connected phase-locked synchronization methods of new energy equipment in weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 26-34, 41.

收稿日期: 2020-09-24

修改稿日期: 2020-09-29

~~~~~  
 (上接第 41 页)

- [2] 孙悦超, 李曼, 廖聪, 等. 电动汽车电机驱动发展分析[J]. 电气传动, 2017, 47(10): 3-6.  
Sun Yuechao, Li Man, Liao Cong, *et al.* Analysis motor drive development in electric vehicles [J]. Electric Drive, 2017, 47(10): 3-6.
- [3] Jo C, Seol J Y, Ha I J. Flux-weakening control of IPM motors with significant effect of magnetic saturation and stator resistance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1330-1340.
- [4] 骆继明, 孔婉琦, 张洋, 等. 电动汽车用混合励磁调制电机设计研究[J]. 电气传动, 2019, 49(6): 83-88.  
Luo Jiming, Kong Wanqi, Zhang Yang, *et al.* Design and research on hybrid excitation field-modulated machine based on FEM[J]. Electric Drive, 2019, 49(6): 83-88.
- [5] 谭超. 电动汽车用新型双定子双馈混合励磁电机的设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
Tan Chao. Research on design of a new dual stator doubly-fed hybrid excitation machine applied in electric vehicles of master thesis[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [6] 井立兵, 高起兴, 王冲, 等. 双转子混合励磁电机优化设计和特性分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 43-50.  
Jing Libing, Gao Qixing, Wang Chong, *et al.* Optimization design and characteristic analysis of dual-rotor hybrid excitation motor[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 43-50.
- [7] 张登旭. 新型双定子混合励磁永磁同步电机的弱磁性能和控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.  
Zhang Dengxu. Flux weakening performance and control analysis of a novel dual-stator hybrid excitation permanent magnet synchronous motor[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [8] Zhu Z Q, Al-Ani M, Liu X, *et al.* A mechanical flux weakening method for switched flux permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 806-815.
- [9] Tassarolo A, Mezzarobba M, Menis R. Modeling, analysis, and testing of a novel spoke-type interior permanent magnet motor with improved flux weakening capability[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(4): 1-10.
- [10] Bolognesi P. A novel rotary-linear permanent magnets synchronous machine using common active parts[C]//15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2010: 1179-1183.
- [11] Ma L, Sanada M, Morimoto S, *et al.* Advantages of IPMSM with adjustable PM armature flux linkage in efficiency improvement and operating range extension[C]//Proceeding of the Power Conversion Conference, IEEE, 2002: 136-141.
- [12] Li C Y, Li C H. Research on variable leakage flux function for a self-adaptive passive flux-weakening PMSM[C]//2017 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, 2016.
- [13] Boldea I, Tutelea L N. PMSM with rotor PM mechanical flux-weakening (MFW) to zero for an 150 kW, 600 Vdc, 500-6 000 rpm drive: preliminary design with key validation[C]//2016 XXII International Conference on Electrical Machines, IEEE, 2016.

收稿日期: 2020-08-18

修改稿日期: 2020-09-25