

# 考虑供电半径延长的配电网用电力电子调压器控制策略

余紫薇<sup>1</sup>, 范越<sup>2</sup>, 赵建勇<sup>1</sup>, 年珩<sup>1</sup>, 马丽山<sup>3</sup>, 杨森林<sup>2</sup>, 于涛<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院浙江省电机系统智能控制与变流技术重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810000; 3. 国网青海省电力公司果洛供电公司, 青海 果洛 814000)

**摘要:**首先针对稀疏地区中低压配电网由于供电半径延长导致的线路末端电能质量问题, 提出基于电力电子调压器的直接电压控制策略, 该策略结合延时信号消除的锁相环同步方式和比例积分谐振器, 能够迅速地改善线路末端低电压以及三相不平衡的电能质量问题, 实现线路电压的动态连续补偿; 然后在此基础上, 进一步推导并验证电力电子调压器装置容量与供电半径的数学关系式, 为该装置在工程上的配置提供理论依据; 最后, 结合稀疏地区配电网实际运行场景, 在 Matlab/Simulink 中搭建电压等级为 10 kV 的电力电子调压器仿真模型, 仿真结果证明所提电力电子调压器直接电压控制策略的有效性以及装置容量与供电半径间的数学关系式的准确性。

**关键词:**电力电子调压器; 低电压; 三相不平衡; 供电半径

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.007 中图分类号: TM726 文章编号: 1673-9140(2022)03-0061-09

## A control strategy of power electronic voltage regulator for distribution network considering extension of power supply radius

YU Ziwei<sup>1</sup>, FAN Yue<sup>2</sup>, ZHAO Jianyong<sup>1</sup>, NIAN Heng<sup>1</sup>,  
MA Lishan<sup>3</sup>, YANG Senlin<sup>2</sup>, YU Tao<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems, College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, China; 3. Guoluo Power Supply Company, State Grid Qinghai Electric Power Company, Guoluo 814000, China)

**Abstract:** The power quality of the middle and low voltage distribution network will deteriorate due to the extension of power supply radius in the sparse areas. To deal with this problem, a direct voltage control strategy based on power electronic voltage regulator is proposed in this paper. The phase-locked loop of delayed signal cancellation and proportional-integral-resonant regulator are employed in this control strategy. And this control strategy quickly improves the power quality for the low and imbalanced voltage at the end of the line, which can dynamically and continuously compensate the line voltage. On this basis, this paper further deduces and verifies the mathematical relationship between the capacity of power electronic voltage regulator and the power supply radius, which provides a theoretical basis for the configuration of device in engineering. Finally, combined with the actual operation condition in the sparse area, a 10-kV power electronic voltage regulator model is developed in Matlab/Simulink. The results demonstrate the effective-

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-01-18

基金项目: 国网青海省电力公司科技项目(5228201900G5)

通信作者: 赵建勇(1987-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事新能源发电技术与储能控制技术研究; E-mail: jyzhao@zju.edu.cn

tiveness of the proposed direct voltage control strategy and the accuracy of the mathematical relationship between the device capacity and the power supply radius.

**Key words:** power electronic voltage regulator; low voltage; three-phase unbalance; power supply radius

稀疏地区是指地广人稀、负荷分散的地理区域,主要分布在荒漠、高原、干旱、极寒等不适宜人类生产居住的区域,中国青海省果洛藏族自治州就是典型的西部稀疏供电地区。党中央、国务院高度重视稀疏、偏远地区用电问题,国家能源局于2013年制定并发布了《全面解决无电人口用电问题三年行动计划(2013—2015年)》,到2015年底已经在青海地区得到全面深度地施行。为了进一步促进稀疏地区的发展,除了解决基本用电问题外,还需关注用户电能质量问题,从而实现电能从有到好的提升。

目前,果洛州配电网存在着诸多电能质量问题,尤其是在边防哨所、牧区、偏僻村庄等边远区域。为减少变电站带来的经济问题,这些地区的配电网往往在低电压等级下延长供电半径、扩大覆盖面积,这直接导致了线路阻抗上的压降较大,供电线路末端出现低电压的问题。此外,供电网在形态上一般表现为单辐射型,各负荷多为居民用电,容量较小,且居民用电多为单相负荷<sup>[1]</sup>,存在三相负荷不平衡的问题,导致配电网容易出现三相电压不平衡的情况,不仅浪费电力资源,也影响了用户电能质量<sup>[2]</sup>。因此,需采取合理的措施来应对低电压和三相电压不平衡的问题,以延长配电网在稀疏地区的供电半径。

目前较为常用的电压补偿方法主要是并联电容器,当配电网存在非线性用电设备时,电容器容易过载并引起配电网谐波电流增大,甚至产生谐波谐振,进而引发过电压和过电流的问题,威胁系统的安全运行<sup>[3]</sup>。同时,电容器本身还存在调节范围有限、调节速度缓慢、不能连续调节、不可频繁投切等问题。除此之外,针对电压补偿的典型装置还有动态电压恢复器(dynamic voltage restorer, DVR),DVR串联于电网与负载之间,当系统电压发生暂降时,可迅速补偿电压,保护负载侧免受电压暂降的影响,但该装置大多需要配置储能,对直流电源容量要求较高,难以实现持续补偿。而且目前对DVR的应用多以点对点的形式进行,装置容量小、工作电压低,若用于稀疏地区的治理,经济性不高<sup>[4]</sup>。

近年来,柔性交流输电系统(flexible AC trans-

mission systems, FACTS)在中国迅速发展<sup>[5]</sup>,FACTS设备静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)、统一潮流控制器(unified power quality controller, UPFC)<sup>[6-10]</sup>等可实现末端电压的连续调节,除电压控制外还可进行潮流控制<sup>[11-12]</sup>,静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)、静止无功发生器(static var generator, SVG)和有源电力滤波器(active power filter, APF)<sup>[13-16]</sup>均可用于负荷不平衡补偿领域,且都具备潮流控制功能。但以上FACTS设备应用场合大多为高压、特高压直流输电<sup>[12]</sup>等主网建设,对于稀疏地区中低压配网不太适用,并且稀疏地区长距离输电主要问题是线路阻抗大、压降高、三相负荷不平衡,延长配电网供电半径、提升节点电压电能质量是主要实现目标,导致FACTS设备改善潮流分布的功能得不到充分应用。针对电能质量的治理,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补偿装置,可以实现面向用户的电能质量综合提升<sup>[17]</sup>。UPQC复合了诸多治理电能质量问题的设备,但稀疏地区所面临电能质量问题主要为低电压和三相电压不平衡,UPQC的电能质量治理功能得不到充分应用,经济性不高。

电力电子调压器(power electronic voltage regulator, PEVR)作为一种能够适用于中低压配电系统的电压补偿装置,近来得到了业内的广泛关注,PEVR可以通过电压的实时反馈实现电压的连续调节,弥补前述设备的缺点,是稀疏配电网中电网电压综合治理的有效补充和延长稀疏地区配电网供电半径的重要手段。因此,研究PEVR的控制策略以及PEVR对供电半径延长在工程中的支撑能力对于该装置的推广应用有着重要的意义。

## 1 PEVR结构与原理

PEVR结构由串联侧换流器和并联侧换流器通

过大电容耦合构成,两侧换流器均采用全控型器件(IGBT 或 GTO),分别通过耦合变压器与输电线路相连。PEVR 结构如图 1 所示。

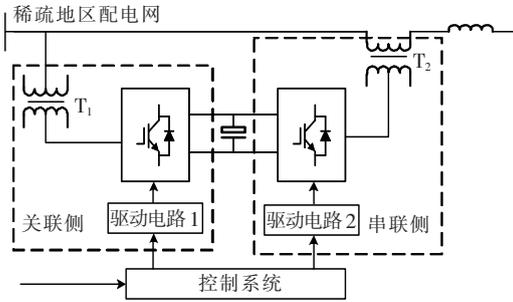


图 1 PEVR 结构

Figure 1 Structure of PEVR

PEVR 并联侧结构和功能与 SVG 相似<sup>[18]</sup>,通过并联变压器向接入点注入或吸收无功电流实现无功补偿。串联侧结构和功能与 SSSC 相似<sup>[19]</sup>,通过串联变压器向输电线路提供幅值、相角以及频率均可连续改变的三相交流电压。PEVR 结合了并联侧无功补偿以及串联侧电压补偿的功能,在功率坐标系中可以实现四象限运行,调节范围较广,能够综合解决稀疏地区供电系统电能质量下降的问题。

## 2 PEVR 控制策略

### 2.1 并联侧换流器控制策略

PEVR 并联侧可用于无功补偿和保持直流母线电压  $V_{dc}$  稳定,满足串联侧的有功功率需求<sup>[20]</sup>。

将  $d$  轴定向于线路末端电压矢量上,经过坐标变换后得到同步旋转坐标系下 PEVR 并联侧的稳态数学模型为

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 i_{shd} - \omega_1 L_1 i_{shq} + u_{shd} \\ 0 = R_1 i_{shq} + \omega_1 L_1 i_{shd} + u_{shq} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $i_{shd}$ 、 $i_{shq}$  分别为输入电流的  $d$  轴、 $q$  轴分量;  $u_{shd}$ 、 $u_{shq}$  分别为换流器中三相全控桥交流输入电压的  $d$  轴、 $q$  轴分量;  $u_{1d}$  为线路末端电压  $d$  轴分量;  $R_1$ 、 $L_1$  分别为并联侧换流器线路的等效电阻和电感;  $\omega_1$  为电网电压的角速度。

通过稳态模型可以搭建交叉解耦的电流内环,实现对电流的快速控制,对于外环,根据并联侧换流器无功功率表达式可以得到无功电流参考值为

$$i_{shq}^{ref} = \frac{Q_{sh}^{ref}}{u_{1d}} \quad (2)$$

式中  $Q_{sh}^{ref}$  为无功功率给定值。并联换流器的有功功率为

$$P_{sh} = u_{1d} i_{shd} \quad (3)$$

因此,并联侧电流  $d$  轴分量  $i_{shd}$  承担起维持有功功率平衡和直流母线电压恒定的作用。为了使直流母线电压稳定在给定值  $V_{dc}^{ref}$ ,对其进行 PI 调节,可以得到有功电流的参考值为

$$i_{shd}^{ref} = K_p \cdot (V_{dc}^{ref} - V_{dc}) + K_i \cdot \int (V_{dc}^{ref} - V_{dc}) \quad (4)$$

式中  $K_p$ 、 $K_i$  分别为 PI 控制器的比例环节系数和积分环节系数。

综上可得到如图 2 所示并联侧换流器控制策略。

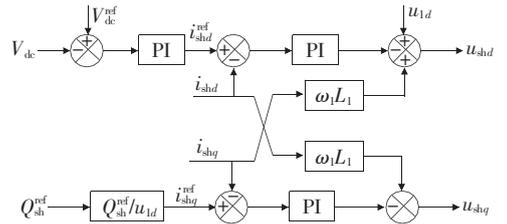


图 2 PEVR 并联侧变流器控制策略

Figure 2 Control strategy of shunt converter in PEVR

### 2.2 串联侧换流器控制策略

PEVR 的电压补偿功能主要由串联侧换流器实现,即通过串联变压器向配电网提供幅值、相角和频率均可以连续改变的三相交流电压。为实现快速电压补偿,本文选择加入 PI 反馈和电压前馈的直接电压控制策略<sup>[21]</sup>,省去大部分 FACTS 设备控制系统中常用的电流内环,避免了复杂的解耦环节,很大程度上简化了控制系统结构,具有较强的实用性。

在合理设置并联侧换流器控制系统参数的情况下,可将 PEVR 并联侧和大电容一起视作一个稳定的直流源,进而可以将 PEVR 串联侧换流器等效为串入配电网的带有等效电感与等效电阻的电压源。为了实现电压补偿,串联变压器输出补偿电压  $u_{se}$  应为线路末端电压  $u_1$  与额定负载电压  $u_{2d}^{ref}$  之差,作为电压前馈部分。由于线路中存在等效电感和等效电阻,其上压降不可忽略,否则会造成稳态误差的存在,为此引入 PI 环。因此,串联侧控制器的工作原理为,检测  $u_2$  在  $d$ 、 $q$  轴上的电压分量  $u_{2d}$ 、 $u_{2q}$ ,分别与给定额定负载电压  $d$ 、 $q$  轴分量  $u_{2d}^{ref}$ 、 $u_{2q}^{ref}$  比较之后进行 PI 调节,加上电压前馈,得到串联侧换流器输出电压  $u_{se}$  的  $d$ 、 $q$  轴分量  $u_{sed}$ 、 $u_{seq}$ ,能够迅速控制

负载电压稳定在给定值。由此可以得到如图3所示 PEVR 串联侧换流器控制策略。

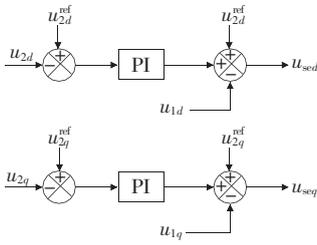


图3 PEVR 串联侧换流器控制策略

Figure 3 Control strategy of shunt converter in PEVR

### 3 不平衡负载工况的治理

#### 3.1 改进锁相环方法

由于稀疏偏远地区负荷分散,负荷容量小,用电类型多为居民用电,单相负荷较多,容易出现三相负荷不平衡的工况,在三相三线制系统中,配电网线路末端电压将会有负序分量的存在,若使用常用的同步坐标系锁相环(SRF-PLL)技术将存在对电压频率和相位信息的检测精度低的问题。针对该问题,本文采用基于延时信号消除(delayed signal cancellation, DSC)的锁相同步方式<sup>[22]</sup>。该方法的主要思想是在 SRF-PLL 前加入一个鉴相器,使 SRF-PLL 的输入仅仅是正序基波信号,最终获取配电网线路末端电压正序基波分量的相位和频率。

通过鉴相器可以得到线路末端电压信号延时  $T/4$  前后的  $\alpha\beta$  分量,即

$$U_{1\alpha\beta} = U_1^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t + \phi_1^+) \\ \sin(\omega_1 t + \phi_1^+) \end{bmatrix} + U_1^{-1} \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t + \phi_1^-) \\ -\sin(\omega_1 t + \phi_1^-) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$U_{1\alpha\beta} \left( t - \frac{T}{4} \right) = U_1^{+1} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t + \phi_1^+) \\ -\cos(\omega_1 t + \phi_1^+) \end{bmatrix} + U_1^{-1} \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t + \phi_1^+) \\ \cos(\omega_1 t + \phi_1^+) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $\phi_1$  为相位;  $U_1$  为线路末端电压有效值,上标“+”和“-”分别代表正、负序分量,联立式(5)、(6)可解得正序基波电压  $\alpha\beta$  分量为

$$\begin{bmatrix} U_{1\alpha}^+ \\ U_{1\beta}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} U_{1\alpha} - U_{1\beta} \left( t - \frac{T}{4} \right) \\ U_{1\beta} + U_{1\alpha} \left( t - \frac{T}{4} \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过式(7)可知,只需四分之一工频周期的延时即可计算获得基波的正序分量信息,简单高效且计算量小。

#### 3.2 谐振控制策略

通过文 3.1 节介绍的锁相同步方式,能够准确检测电网电压正序基波相位,在此基础上得以对负序分量进行精准控制。经过坐标变换,可以在同步旋转坐标系下得到代表正序电压的直流分量和代表负序电压的二倍频分量。针对直流分量,采用文 2.2 节中的直接电压控制策略,可以使负载电压稳定在给定值,对于二倍频的交流分量则需要引入能够有效控制交流信号的谐振控制器<sup>[23]</sup>,其传递函数为

$$G_R(s) = \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_s^2} \quad (8)$$

式中  $K_r$  为谐振系数;  $\omega_c$  为谐振控制器的截止频率,  $\omega_s$  为谐振频率,在这里选为二倍频  $100\pi$  rad/s。

由于谐振控制器的控制目的是消除负序分量,因此应将谐振控制器的给定输入值设置为零,以达到削弱  $d$ 、 $q$  轴上二倍频交流电压幅值的效果。谐振控制器的输出和直流电压 PI 控制器的输出相叠加之后,一同构成比例积分谐振(PIR)电压调节器,与电压前馈一起送入到 SVPWM 调制模块,可以得到能控制负序和直流分量的串联侧换流器 PWM 信号。

### 4 装置容量与供电半径的关系

由于 PEVR 容量有限,其电压补偿能力也会受到相应限制,故供电半径不能无限延长。因此,需要根据装置容量与供电半径间的制约关系来合理配置 PEVR,以实现最优补偿。

PEVR 的容量设计由串联部分和并联部分组成,在容量配置时可根据实际需要分别设计。本文重点研究 PEVR 串联侧电压补偿作用及其控制策略,为简化分析,研究时并联部分暂不考虑额外配置无功补偿容量,且忽略 PEVR 装置内部功率损耗及谐波问题。因此,在功率平衡原则下可认为 PEVR 并联部分和串联部分容量相等,并将其统称为装置容量  $P_{pevr}$ 。

利用如图 4 所示理想等效电路,可以分析得到如图 5 所示稳态时各电压电流的相位关系。由于在锁相环中将直轴分量定向于线路末端电压  $U_1$ ,且在

串联侧变流器的控制策略中采用了  $u_{2q} = 0$  的控制方式,使得负载电压  $U_2$  与线路末端电压  $U_1$  始终保持同相位,PEVR 输出补偿电压  $U_{se}$  也相应保持同相位。此外,由于稀疏地区主要面向居民用户,负载多为电阻型负载,同时并联侧变流器采用单位功率因数的控制方式,使得负载电流  $I_3$ 、电网电流  $I_1$  与负载电压  $U_2$  也保持同相位。

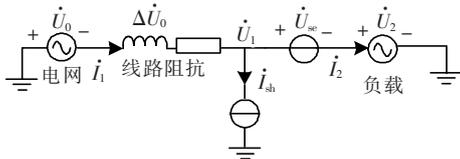


图 4 PEVR 理想等效电路

Figure 4 ideal equivalent circuit of PEVR

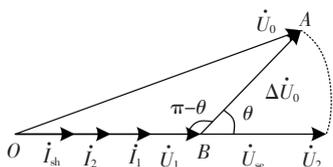


图 5 PEVR 稳态时电压电流相量

Figure 5 voltage phasor and current phasor of PEVR in steady state

因此,电网电流  $I_1$ 、负载电流  $I_2$ 、PEVR 并联侧电流  $I_{sh}$  相位相同,有效值可直接相加,即

$$I_1 = I_2 + I_{sh} = \frac{P_L}{3U_2} + \frac{P_{pevr}}{3U_1} \quad (9)$$

式中  $P_L$  为负载功率。负载电压  $U_2$  有效值由线路末端电压  $U_1$  与补偿电压  $U_{se}$  相加得到,即

$$U_2 = U_1 + U_{se} = U_1 + \frac{P_{pevr}}{3I_2} \quad (10)$$

联立式(9)、(10),可以计算得到线路末端电压  $U_1$  的有效值为

$$U_1 = (1 - \frac{P_{pevr}}{P_L})U_2 \quad (11)$$

线路阻抗功率因数角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_0}{r_0}\right) \quad (12)$$

由于电网电流与负载电压相位相同,线路压降  $\Delta U_2$  与电网电流  $I_1$  之间的夹角为功率因数角  $\theta$ ,则根据如图 5 所示相位关系,在  $\Delta ABO$  中,可以利用余弦定理,得到求解线路压降  $\Delta U_0$  有效值的方程为

$$\Delta U_0^2 - 2\Delta U_0 U_1 \cos(\pi - \theta) + U_1^2 - U_0^2 = 0 \quad (13)$$

线路压降  $\Delta U_0$  与电网电流  $I_1$  有效值的关系可表示为

$$\Delta U_0 = I_1 R_{ad} \sqrt{x_0^2 + r_0^2} \quad (14)$$

式中  $x_0$ 、 $r_0$  为电力线路每公里的电抗和电阻值; $R_{ad}$  为供电半径。在本文提出的控制策略下,可控负载电压  $U_2$  与电网电压  $U_0$  有效值相等。

综上,联立式(11)~(14),可以得到供电半径  $R_{ad}$  和 PEVR 装置系统参数 ( $P_{pevr}$ 、 $P_L$ 、 $U_0$ 、 $x_0$ 、 $r_0$ ) 之间的数学关系式为

$$R_{ad} = \frac{-2U_0(1 - \frac{P_{pevr}}{P_L})\cos\theta}{2\sqrt{x_0^2 + r_0^2}(\frac{P_L}{3U_0} + \frac{P_{pevr}}{3((1 - \frac{P_{pevr}}{P_L})U_0)})} + \frac{U_0\sqrt{4(1 - \frac{P_{pevr}}{P_L})^2\cos^2\theta - 4((1 - \frac{P_{pevr}}{P_L})^2 - 1)}}{2\sqrt{x_0^2 + r_0^2}(\frac{P_L}{3U_0} + \frac{P_{pevr}}{3((1 - \frac{P_{pevr}}{P_L})U_0)})} \quad (15)$$

根据式(15)对  $P_{pevr}$  进行求偏导,可以分析得到:在其余系统参数保持不变的情况下,供电半径  $R_{ad}$  与装置容量  $P_{pevr}$  呈正相关关系,也可以通过画图证实其正相关特性,如图 6 所示。线路阻抗参数参考 LGJ、LJ-120,  $U_0$  为 10 kV 配电网相电压有效值,绘制了负载功率为 100 kW 时供电半径  $R_{ad}$  与装置容量  $P_{pevr}$  间的关系曲线。综上可知,在 PEVR 容量以及其余系统参数已知的情况下,式(15)计算得到的供电半径是该情况下 PEVR 装置所能作用的最长供电半径,可为 PEVR 在工程中的配置提供参考。

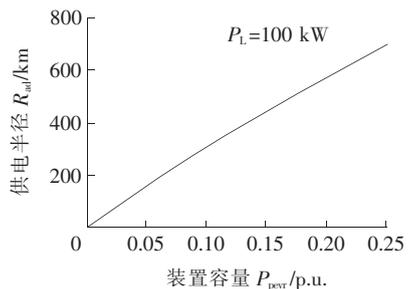


图 6 装置容量和供电半径的关系曲线

Figure 6 The relation curve of device capacity and power supply radius

## 5 算例分析

本文针对稀疏地区由于供电半径延长、负荷分

散导致的低电压和三相不平衡的电能质量问题,提出了基于 PEVR 的控制策略,为了验证该控制策略的性能,在 Simulink 中搭建了图 7 所示仿真模型。

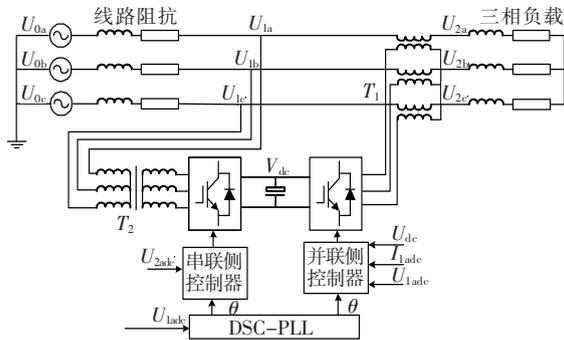


图 7 基于 PEVR 的电网电能质量治理仿真模型

Figure 7 Simulation model of power grid quality management based on PEVR

为了模拟青海省果洛地区配电网情况,仿真模型中将线路阻抗的参数设定为: $r_0 = 0.27 \Omega/\text{km}$ 、 $x_0 = 0.335 \Omega/\text{km}$ (LGJ、LJ-120)。目前青海地区已知最长的 10 kV 输电线路在果洛地区,长度为 233 km。因此为了充分验证该装置的可行性,仿真中将线路长度设置为 300 km。其余仿真模型参数如表 1 所示。

表 1 PEVR 系统参数

Table 1 PEVR system parameters

参数	符号	单位	数值
配电网电压等级	$U_1$	kV	10
串联侧变压器变比	$T_1$	—	0.38/10
并联侧变压器变比	$T_2$	—	10/0.38
直流母线额定电压	$V_{dc}$	V	650
直流母线电容	$C_1$	F	0.05
串联侧滤波电路	$L$	mH	5
	$C$	$\mu\text{F}$	200
并联侧滤波电路	$L$	mH	5
	$C$	$\mu\text{F}$	200
谐振控制器截止频率	$\omega_c$	rad/s	5

算例 1 投入 PEVR 时的低电压补偿。为了验证本文提出的 PEVR 控制策略对于线路末端低电压具有电压补偿的功能,在仿真中设置了在 0.1 s 投入 PEVR 装置,此时三相负载为平衡负荷,额定功率为 100 kW。PEVR 投入前后的各个波形如图 8 所示。

由图 8 可知,投入 PEVR 前,线路末端电压等于负载电压。由于线路阻抗上产生的压降较大,线

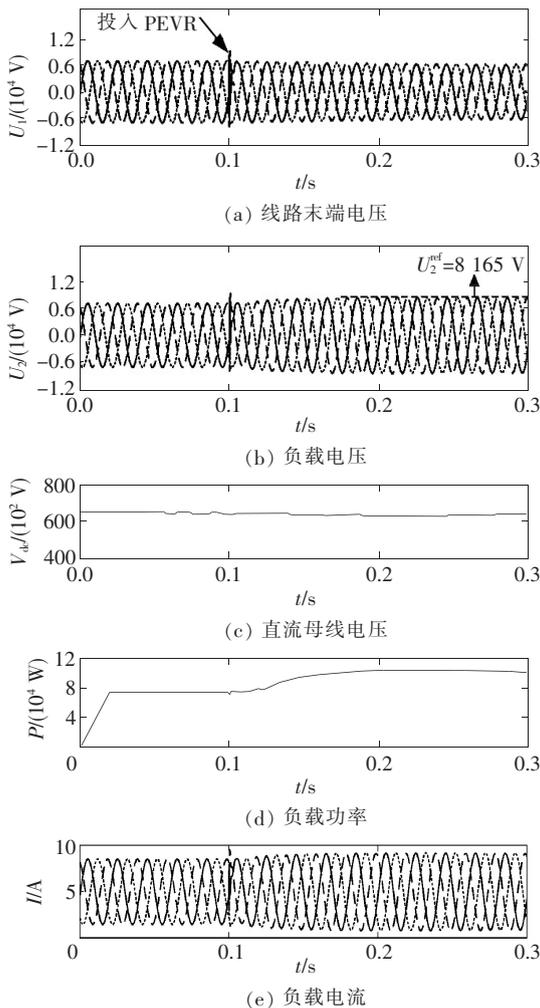


图 8 PEVR 投入前后的波形

Figure 8 Waveforms before and after switching PEVR

路末端电压较低,单相电压幅值仅为 6 923 V,电压跌落率达到 15.2%,输出功率仅为 73.5 kW,无法满足用户侧的用电需求。投入 PEVR 后,电压补偿装置迅速响应,在 0.05 s 之内实施了负载电压的补偿,基本可以实现负载电压无差控制。达到稳态后,单相电压幅值补偿至 8 102 V,电压跌落率降低至 0.76%,电流增大,输出功率达到 100 kW。通过并联侧换流器,直流母线电容电压维持在 650 V 左右。

负载电压得以补偿后,由于负载电流增加,使得线路上压降和损耗也略有增加,这是此类装置不可避免的损失,但其经济性还是远优于直接增设变电站的传统解决方案。因此,可以认为该 PEVR 控制策略能够作为治理稀疏地区低电压电能质量问题的有效手段。

算例 2 负载功率突增时的低电压补偿。在负载功率出现突增时,线路电流将会增大,进而增大线

路阻抗压降,导致线路末端电压进一步降低,为了验证 PEVR 具有实时电压补偿的能力,在仿真中设置了 0.5 s 出现负载额定功率由 40 kW 至 80 kW 的突增,仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可知,负载突增前,负载电压、直流母线电压以及负载功率均维持在给定值,当突增负载功率,PEVR 迅速响应,仅通过 0.05 s 达到稳态,线路末端电压由 7 482 V 降低至 6 738 V,电压跌落率由 8.35% 增加到 17.47%。通过 PEVR 装置的电压补偿功能,负载电压单相幅值维持在 8 113 V 左右,电压跌落率保持为 0.62%,功率迅速由 40 kW 跟随至 80 kW。在此期间,直流母线电压维持在 650 V。因此,可以认为该 PEVR 控制策略能够有效地应对负载功率突增的情况,维持负载电压的恒定。

算例 3 三相负荷不平衡时的电压补偿。由于稀疏地区负荷分散,用户用电类型多为单相负荷,

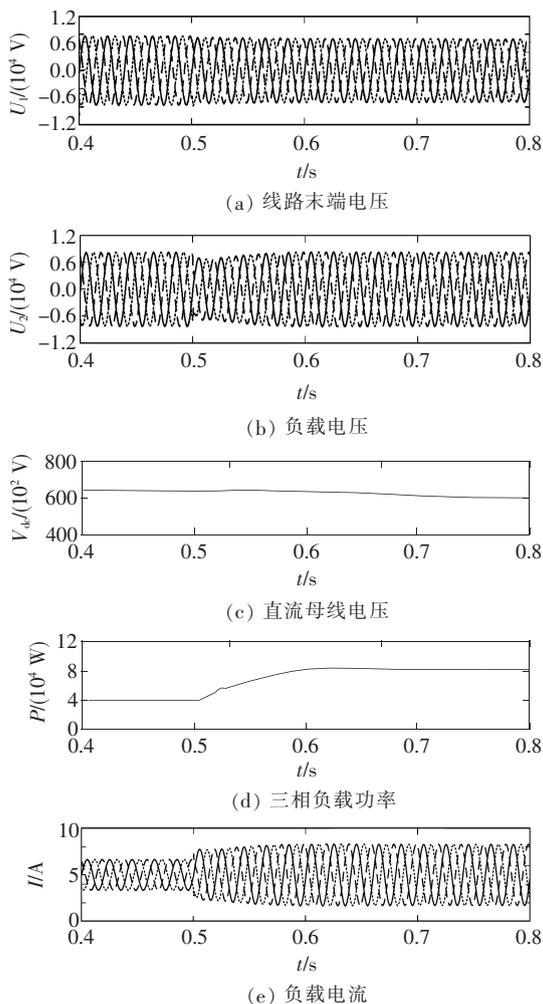


图 9 负载功率突增前后电压补偿波形

Figure 9 Voltage compensation waveform before and after the sudden increase of load power

三相负荷不平衡导致三相电流不平衡,由于供电半径延长,线路阻抗不容忽视,容易出现配电网三相电压不平衡的情况。为了模拟此种场景,在仿真过程中设置了三相负荷功率不一样的负荷情况,即 A 相负荷额定功率 20 kW, B 相负荷额定功率 20 kW, C 相负荷额定功率约为 0.75 kW,以此验证 PEVR 控制策略在不平衡负荷工况下的电压补偿能力。仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知,当出现三相负荷不平衡问题时,线路中存在不平衡电流,由于输电线路三相线路阻抗通常保持一致,因此线路末端电压也出现了不平衡的电网工况。由于 PEVR 的串联谐振控制器针对负序分量具有较优的治理能力,负载电压依旧保持为比较理想的三相平衡的正弦波,直流母线电压维持在 650 V,稳态时各相负载功率均保持在给定

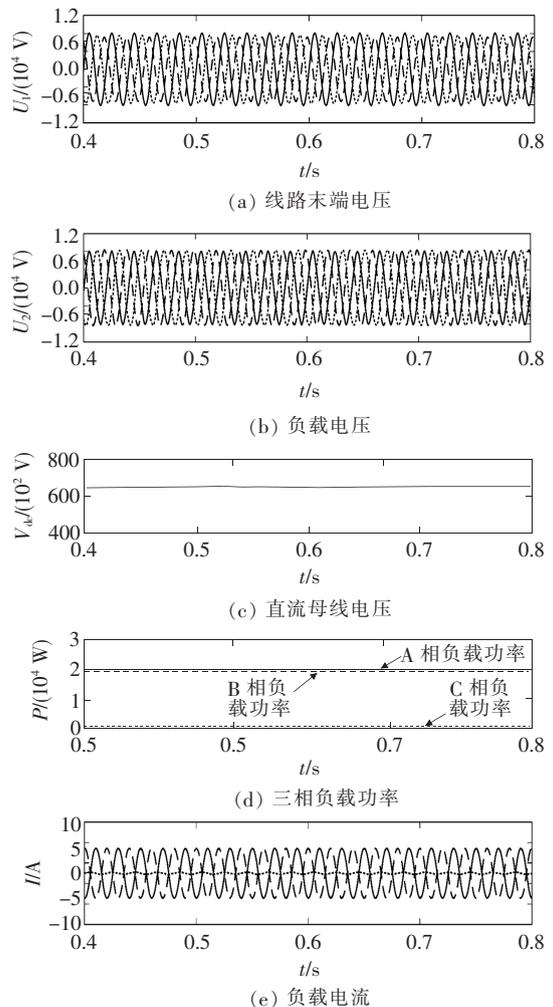


图 10 三相负载不平衡时电压补偿波形

Figure 10 Voltage compensation waveform when three-phase load is unbalanced

值附近。因此,可以认为该 PEVR 控制策略能够有效地治理三相不平衡负荷导致的电能质量问题。

算例 4 PEVR 装置容量与供电半径间数学关系的仿真验证。在算例 1 中仿真模型的基础上,改变供电半径的长度,测量并计算在不同供电半径下 PEVR 串、并联侧输出功率的平均值,作为此时 PEVR 装置容量,代入式(15)计算出供电半径的理论值,与仿真值进行对比,即可验证供电半径和 PEVR 容量之间数学关系的正确性。数学关系式仿真验证结果如表 2 所示。

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation results

供电半径仿真值/km	PEVR 容量/kW	供电半径理论值/km	误差/%
50	1.395	50.398 0	0.796
100	2.870	101.035 1	1.035
150	4.260	146.365 2	2.423
200	5.750	192.487 2	3.756
250	7.545	244.797 2	2.081
300	9.700	303.114 0	1.038
400	13.675	398.619 0	0.345

由表 2 可知,供电半径的理论值与仿真值基本相同,误差主要来自于仿真模型中 PEVR 输出功率的测量误差以及 PEVR 装置自身功率损耗,但误差较小,基本可以忽略。因此,式(15)所示数学模型的正确性得以证实。

## 6 结语

本文针对稀疏地区长距离供电、负荷分散造成的低电压以及三相电压不平衡问题,提出配电网用电力电子调压器直接电压控制策略,这种控制策略在传统直接电压控制策略的基础上融入了延时信号消除的锁相环同步方式和比例积分谐振器,使得负载侧电压电能质量得到了显著提升,延长了中低压配电网的供电半径。在实现该控制策略的基础上,本文推导并验证了供电半径与装置容量间的数学关系,为 PEVR 装置在工程上的配置提供了参考。本文所提控制策略逻辑简单,在工程上更加容易得以实现,此策略应用于电力电子调压器后将使该装置

在稀疏地区供电半径延伸工程中具有更加明显的支撑效果,适用于改善稀疏地区中低压配电网供电半径延长造成的电能质量问题,而装置容量与供电半径间数学关系的推导也将为该装置在工程上的配置提供重要的理论依据。

## 参考文献:

- [1] 李磊. 低压配电网三相负荷不平衡补偿技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [2] 王仰铭,孙丹,年珩,等. 不平衡电网下自同步虚拟同步机拓展功率控制策略研究[J]. 电网技术,2020,44(9): 3368-3375.  
WANG Yangming, SUN Dan, NIAN Heng, et al. Extended power control strategy of self-synchronized virtual synchronous generator under unbalanced power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3368-3375.
- [3] 谢睿. 谐波对配电网并联电容器的影响与对策研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [4] 周军,刘娜,李曙光. 基于等效半波注入法的小电流接地故障选线[J]. 电测与仪表,2020,57(4):55-60.  
ZHOU Jun, LIU Na, LI Shuguang. Small current grounding fault line selection based on equivalent half wave injection method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4): 55-60.
- [5] 米阳,王鹏,邓锦,等. 孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20):1-8.  
MI Yang, WANG Peng, DENG Jin, et al. Hierarchical coordinated control of isolated AC-DC hybrid microgrid group [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 1-8.
- [6] 熊莉. 基于统一潮流控制器(UPFC)的电力系统潮流控制[J]. 电力科学与技术学报,2007,22(3):32-35.  
XIONG Li. Power flow analysis with unified power flow controller considerd [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22(3): 32-35.
- [7] 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.
- [8] 陈曦. UPFC 提高电力系统电压稳定控制研究[D]. 南京:东南大学,2016.

- [9] DUAN X Z, CHEN J F, PENG F J, et al. Power flow control with FACTS devices[C]//Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134), Seattle, USA:IEEE,2000.
- [10] 刘黎明,康勇,陈坚,等. SSSC 建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报,2006,21(9):37-43.  
LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Static synchronous series compensator: modeling, control scheme and performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(9):37-43.
- [11] 童强. 含 FACTS 元件的电力系统潮流计算模型与算法的研究[D]. 长沙:湖南大学,2005.
- [12] 刘健彝,张波,徐鹏飞. 雨天交流输电线路电晕放电判据[J]. 智慧电力,2020,48(4):15-20,35.  
LIU Jianben, ZHANG Bo, XU Pengfei. Corona discharge criterion for AC transmission lines in the rain[J]. Smart Power,2020,48(4):15-20,35.
- [13] 杨素,武泽辰,王冬辉,等. 关键技术发展对配电网自然垄断属性的影响[J]. 中国电力,2021,54(2):175-181.  
YANG Su, WU Zechen, WANG Donghui, et al. The impact of key technology development on the natural monopoly attribute of distribution network[J]. Electric Power,2021,54(2):175-181.
- [14] 郇钰淇. 有源滤波在配网中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [15] 丘冠新,朱鹏宇,王灿,等. 负载不平衡条件下 MMC-STATCOM 补偿策略研究[J]. 电力工程技术,2020,39(2):35-42.  
QIU Guanxin, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. The compensation method of MMC-STATCOM under unbalanced load condition[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(2):35-42.
- [16] 刘胜军,孙志鹏,沈辰,等. 基于振动频谱分析和总谐波畸变率的电力变压器故障诊断方法研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(3):86-91.  
LIU Shengjun, SUN Zhipeng, SHEN Chen, et al. Research on fault diagnosis of power transformers based on spectral analysis of vibration signals and total harmonic distortion[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(3):86-91.
- [17] BHOSALE S S, BHOSALE Y N, CHAVAN U M, et al. Power quality improvement by using UPQC: a review[C]//2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICPCCT), Kannur, India:IEEE,2018.
- [18] 谭向宇,赵现平,王科,等. 三相同壳 GIS 母线相电压测量解耦方法研究[J]. 高压电器,2021,57(11):51-59.  
TAN Xiangyu, ZHAO Xianping, WANG Ke, et al. Study on decoupling method for phase voltage measurement of three phase enclosed GIS busbar[J]. High Voltage Apparatus,2021,57(11):51-59.
- [19] 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.
- [20] 汤赐,罗安. 配电网静止同步补偿器的前馈解耦控制策略[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):40-44.  
TANG Ci, LUO An. Feed-forward decoupling control strategy of DSTATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):40-44.
- [21] 吕文韬,汪冬辉,沈忱,等. UPFC 的直接电压控制及其应用[J]. 浙江电力,2015,34(11):38-41.  
LYU Wentao, WANG Donghui, SHEN Chen, et al. Direct voltage control of UPFC and its application[J]. Zhejiang Electric Power,2015,34(11):38-41.
- [22] 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. Overview of phase-locked synchronization methods of renewable energy equipment in weak and distorted grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):26-34+41.
- [23] 胡家兵. 双馈异步风力发电机系统电网故障穿越(不间断)运行研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.