

基于移相电压误差补偿的新型单/三相变换系统控制策略研究

李蓉蓉¹, 左 为¹, 冉念洁¹, 周 苏¹, 王心仪²

(1. 国网四川省电力公司营销服务中心, 四川 成都 610065;

2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 农、牧偏远地区及电气化铁路沿线地区光照资源丰富、空间资源充足, 具有良好的分布式光伏的建设条件, 在这些地区引入分布式光伏, 不仅能够迎合“新能源就近就地消纳”的政策要求, 还能为系统提供一定的能量支撑, 并在一定程度上提高系统的灵活性。为解决单/三相变换、电能质量综合治理、光伏能源就地消纳的问题, 以“传统控制改进-新型拓扑提出-底层控制研究-协调控制设计”为主线开展研究, 提出了一种计及光伏接入且具有电能质量治理能力的单/三相变换系统, 并在 Matlab/Simulink 中搭建了系统的相关仿真模型。仿真结果验证了所提新型单/三相变换系统及其协调控制策略的正确性及有效性。

关键词: 分布式光伏; 单三相变换; 协调控制; 电能质量治理

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)02-0032-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240206

Research on Control Strategy of New Single/Three-phase Transformation System Based on Phase-shift Voltage Error Compensation

LI Rongrong¹, ZUO Wei¹, RAN Nianjie¹, ZHOU Su¹, WANG Xinyi²

(1. Marketing Service Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China)

Abstract: Agriculture and animal husbandry in remote areas and electrified areas along the railway is rich in light resources and sufficient space resources, which has good construction conditions of distributed photovoltaic, so the introduction of distributed photovoltaic in these areas can not only to cater to the "new energy locally given nearby" policy requirements, also can provide certain energy support for the system, and to a certain extent, it can improve the flexibility of the system. In order to solve the problems such as single/three-phase transformation, power quality control and local accommodation of photovoltaic energy, and taking "traditional control improvement-new topology-underlying control research-coordinated control design" as the main line, a single/three-phase transformation system with power quality control ability is put forward considering photovoltaic access, and the related simulation models are established in Matlab/Simulink. The simulation results verify the correctness and effectiveness of the new single/three-phase transformation system and its coordination control strategy.

Key words: distributed photovoltaic; single/three-phase transformation; coordination control; power quality control

0 引言

对于电气化铁路沿线地区而言, 由于非牵引负荷从电力贯通线取电时, 存在瞬时性故障概率较高、须敷设专用线路、末端压降普遍以及用电成本高等一系列问题, 因此从单相 27.5 kV 牵引母线侧获取

电能成为未来的重要趋势^[1]。为了保障铁路动力机械设备的正常用电, 该方案中必然存在将单相转换为三相的过程。另外, 当非牵引负荷从 27.5 kV 牵引母线侧取电时, 所获取的单相交流电压易受牵引网电能质量影响, 也将存在电压波动范围大、谐波含量复杂、电流污染等严重的电能质量问题^[1], 影响所接负荷的正常运行, 甚至产生通信信号中断、抢修进

度停滞等严重后果^[2-3]。

目前,针对单相供电地区存在三相用电需求的问题,主要有两种解决方案:1)通过对单相供电台区进行电力改造,将单相供电线路改造为三相供电线路;2)采用单相变三相变换设备或系统。由于地理环境及经济基础的限制,在单相供电地区重新架设三相电网将存在配电网造价高、运行维护成本高等问题^[4]。而单相变三相方案的投资较低,便于运输,可实现多用户之间的交替使用,能够很好地满足季节性用电需求,具有较高的经济性和灵活性。因此,采用单/三相变换方案成为解决单相供电台区三相用电问题的有效方案之一。

下面以“传统控制改进-新型拓扑提出-底层控制研究-协调控制设计”为主线,首先,从混合型单/三相变换系统的工作原理出发,对影响输出电压不平衡的因素进行分析,并针对由交直交变换器输出误差造成的不平衡度较高的问题,提出了一种改进控制策略;然后,针对电气化铁路沿线地区及偏远地区网侧存在的电能质量问题,在混合型单/三相变换系统的基础上,提出了一种计及光伏的具有电能质量综合治理能力的新型单/三相变换系统;最后,设计了相应的协调控制策略,通过控制系统在不同工况下工作模式的自动切换,保障单/三相变换系统的安全、稳定运行。

1 新型单/三相变换系统结构

所提出的新型单/三相变换系统结构如图 1 所示,主要包含串联变换器、并联变换器、光伏单元、储能单元、串联变压器及两相/三相变压器。由图 1 可知,光伏阵列通过 Boost 变换器并联接入交直交变

换器的直流侧,由于光伏模块不具有储存能量的功能,因此功率只能从光伏模块向中间直流侧单向流动。储能单元经双向 DC/DC 变换器与中间直流电容并联。在系统有多余能量时,储能单元可通过控制双向 DC/DC 变换器吸收多余能量,实现能量的定向存储;在系统存在能量缺额时,可通过控制双向 DC/DC 变换器发出能量,调节系统的功率平衡,以保证系统的稳定运行。

新型单/三相变换系统的核心就是并联变换器和串联变换器。并联变换器在混合型单/三相变换系统的基础上,与传统光伏并网逆变器结构进行了组合,在补偿供电侧谐波及无功电流的同时,也实现了光伏并网发电的功能;串联变换器结合 DVR 桥式结构,新增了一路输出,该路输出经串联变压器串联接入供电侧,对接入点电压进行补偿,从而保证后端负载的端口电压为理想的正弦波。此外,在供电网发生故障切出时,光储单元能够对中间直流电容进行充电,通过串联变换器向系统提供电压支撑,起到不间断电源的功能。

图 2 为所选用的交直交变换器的拓扑结构,即并联侧和移相侧均采用全控 H 桥结构。并联侧和移相侧背靠背连接,共用中间直流稳压电容,并在输出侧端口分别加入 L 滤波和 LC 无源滤波装置,目的是为了降低电流纹波及滤除高次谐波。其中: u_s 为网侧电压; i_{s1} 为并联侧输入电流; u_{dc} 为中间直流电压; u_β 和 i_β 为向平衡变压器 β 端口输出的电压、电流。

变换器并联侧并联接入供电侧,一方面起稳定中间直流电压和补偿谐波、无功电流的作用,一方面通过控制开关器件的通断,控制输出电压,将单相交

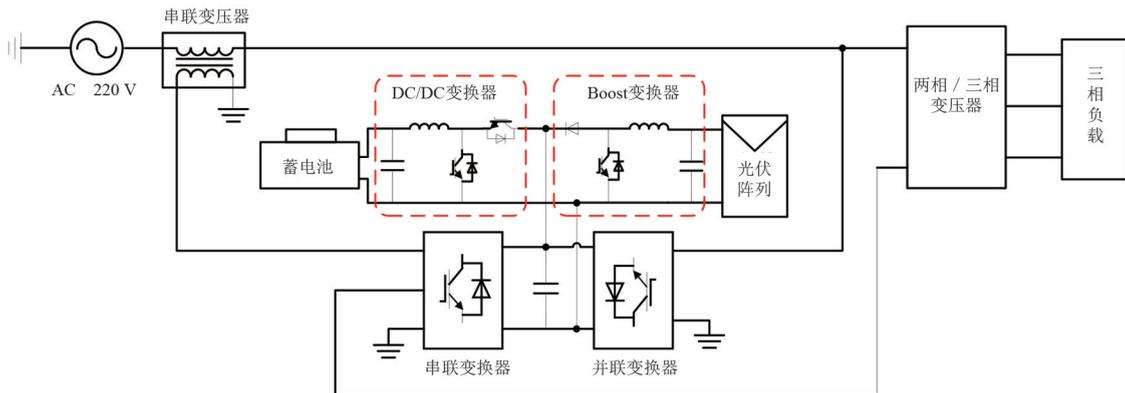


图 1 新型单/三相变换系统拓扑结构

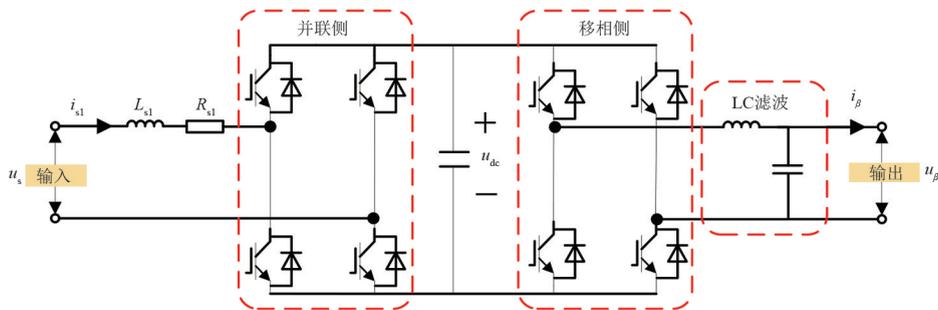


图 2 交直交变换器主电路

流电压 u_s 变换为稳定的直流电压 u_{dc} 。移相侧通过控制开关器件的通断,将中间直流电压变换为交流电,经 LC 无源滤波器向平衡变压器的 β 端口提供所需的移相电压。

当交直交变换器稳态运行时,中间直流侧电压维持恒定。此时,在不考虑功率损耗的情况下,并联侧从供电侧吸收与负载消耗等额的功率,保证系统的功率平衡。

2 移相电压误差补偿控制策略研究

2.1 移相电压误差补偿控制设计

由前述分析可知,在不考虑网侧电压 u_s 对输出电压的影响时,交直交变换器输出电压 u_β 的误差与系统输出电压的三相不平衡度成正比。移相变流器输出电压控制过程如下:1)经锁相环提取网压信号相位信息后,分别采用三角函数计算及有源低通滤波器滤波后得到目标幅值及相位信息,所得目标幅值与目标相位的单位正弦分量相乘后作为移相电压参考信号 u_β^* ;2)通过移相侧反馈控制环路对输出电压参考信号 u_β^* 进行跟踪,即可得到移相变流器输出电压 u_β 。

在以上控制过程中,输出电压参考信号 u_β^* 由网压信号的相位计算而成,而网压信号 u_s 的相位信息的提取过程中引入了锁相环。锁相环路通过相位对系统进行无频差跟踪,实际为相位负反馈系统,在锁相环路锁定后,必定存在一个固定的相位差,锁相环路的稳态相位差可表示为

$$\theta_e(\infty) = \arcsin \frac{\Delta\omega}{K} \quad (1)$$

式中: K 为环路锁定时的环路总增益; $\Delta\omega$ 为环路固有频差。由此可知,锁相环内部环路参数及输入信号决定了锁相环路的稳态相位差,当采用不同锁相

环或输入信号发生改变时,须计算并调整锁相环路输出信号的相差补偿。

此外,由于变换器输出电压经逆变控制反馈环路对输出电压参考信号进行跟踪,因此当系统稳定时必然存在稳态误差。根据终值定理,系统的稳态误差为

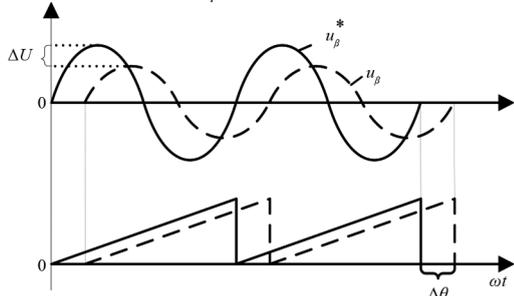
$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2)$$

式中: e_{ss} 为系统稳态误差; $R(s)$ 为输入信号; $G(s)$ 、 $H(s)$ 为系统开环传递函数。可以看出,反馈回路的稳态误差与系统输入信号 $R(s)$ 的形式、系统的结构及参数有关。当系统结构或参数发生改变时,反馈回路的稳态误差也会随之改变。

综上所述,实际应用过程中,移相侧控制过程中存在的非理想因素将会在移相电压 u_β 中引入误差,使得实际输出的移相电压 u_β 与参考电压 u_β^* 不能完全一致。

2.2 误差归一化处理

如图 3 所示,移相电压 u_β 的输出误差可分解为幅值和相位的误差,定义由前述非理想因素引起的移相电压 u_β 的幅值、相位误差分别为 ΔU 和 $\Delta\theta$ 。易知,当移相电压 u_β 存在输出误差时,其不同类型非理想环节中引起的累积误差可归一化为参考电压 u_β^* 与实际移相电压 u_β 的偏差。此时,幅值误差 ΔU

图 3 移相电压 u_β 输出误差归一化

和相位误差 $\Delta\theta$ 即为移相侧输出电压 u_β 实现完全补偿时所需的补偿量。

2.3 电压误差补偿思路

目前,对变换器输出误差补偿策略的研究通常是从单一非理想因素造成的误差出发开展研究,无法实现对移相电压误差的全补偿。为实现移相电压误差的完全补偿,提出一种基于电压重构的误差控制策略,其实现步骤如下:

- 1) 采集移相侧输出移相电压 u_β 。
- 2) 引入锁相环,经锁相环得到 u_β 的角频率及相位信息 θ_β ,并提取移相侧输出移相电压 u_β 的幅值 U_β 。
- 3) 将参考电压 u_β^* 的幅值 U_s 与移相侧输出移相电压 u_β 的幅值 U_β 做差,得到幅值误差 ΔU ; u_β^* 的相位 $\theta_s + \pi/2$ 与 θ_β 做差,得到相位误差 $\Delta\theta$ 。
- 4) 反馈所得到的幅值误差 ΔU 和相位误差 $\Delta\theta$,在参考电压 u_β^* 的基础上,生成重构的参考电压信号 u_{β^*} ,其表达式为

$$u_{\beta^*} = (U_s + \Delta U) \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \Delta\theta\right) \quad (3)$$

上述移相电压重构原理如图 4 所示。

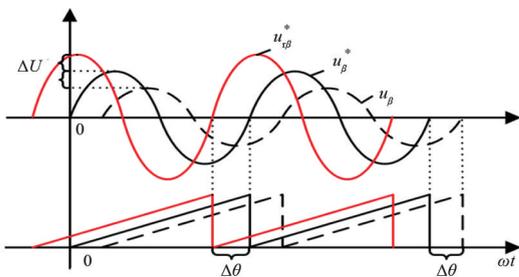


图 4 移相参考电压重构原理

由图 4 可知,上述步骤在原参考移相电压 u_β^* 的基础上,将各个环节的累积误差信息送入控制回路,对参考移相电压进行实时调整,使得 u_{β^*} 与 u_β^* 之间的关系如式(3)所示,从而实现输出电压误差的补偿。

2.4 电压误差预补偿控制方案设计

根据前述原理,可设计移相电压误差补偿控制框图如图 5 所示。其中,在重构参考电压 u_{β^*} 时所引入的锁相环(phase-locked loop, PLL)与传统方案的特性相同,因此在锁相过程中引入的误差也相同。由此易知,通过做差运算即可消除锁相误差对控制回路的影响。

图 5 中,在移相侧利用传统的参考电压提取方案的基础上,加入了移相电压 u_β 的幅值及相位信息的检测。对参考电压信号 u_β^* 与实际移相电压 u_β 的做差,可得到控制中任意非理想因素所造成的误差之和。将所得到的误差和馈入控制回路,即可得到重构后的参考电压 u_{β^*} 。再使移相侧的输出电压跟随参考电压 u_{β^*} ,即可实现输出电压误差的补偿。

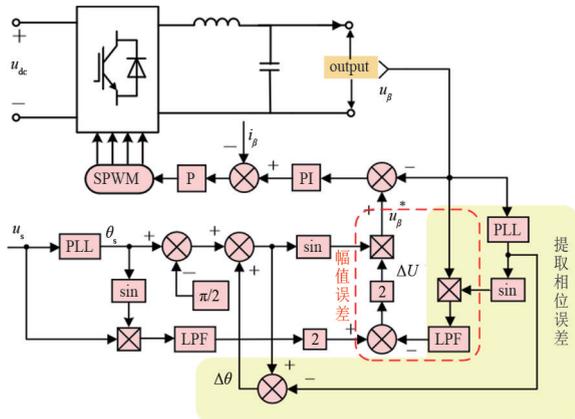


图 5 移相电压误差补偿控

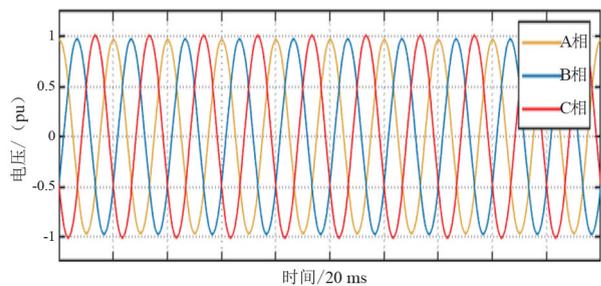
3 仿真结果与分析

为验证所提误差补偿控制策略的有效性,基于 Matlab/Simulink 仿真平台对该策略在理想网压和含有谐波网压的工况下分别进行仿真验证,仿真的基本参数如表 1 所示。电压基准值按照单相额定电压 220 V 选取。

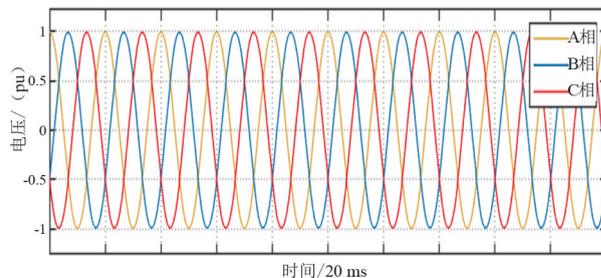
表 1 混合型单/三相变换系统关键电路

项目	参数
输入单相电压(50 Hz)/V	220
输出三相线电压(50 Hz)/V	380
中间直流参考电压/V	700
中间直流电容/ μF	5000
并联侧输入电感/mH	2
并联侧输入电阻/ Ω	0.2
移相侧滤波电感/mH	2
移相侧滤波电容/ μF	120

首先,对网侧电压理想情况下,传统控制及误差补偿控制策略进行仿真验证,传统控制及误差补偿控制下的三相电压波形分别如图 6(a)、(b) 所示。



(a) 传统控制



(b) 误差补偿控制

图 6 系统三相电压输出波形

对上述三相电压的不平衡度进行分析计算可知:在理想网侧电压条件下,变换器采用传统控制时,系统输出的三相电压不平衡度为 2.560%;采用误差补偿控制时,系统输出的三相电压不平衡度为 0.017%。

为了更直观地看出误差预补偿的控制效果,图 7 展示了在误差补偿控制下,变换器输出电压 u_{β} 、原参考电压信号 u_{β}^* 以及重构参考电压信号 u_{β}^* 的放大仿真波形。

由图 7 可知,在系统采用补偿控制时,重构参考电压信号 u_{β}^* 与原参考电压信号 u_{β}^* 之间存在误差。但由于 u_{β}^* 包含了误差补偿信息,实际输出的移相电压 u_{β} 与 u_{β}^* 的波形几乎完全一致,证明了所提误差补偿控制策略能实现电压误差的近似全补偿。

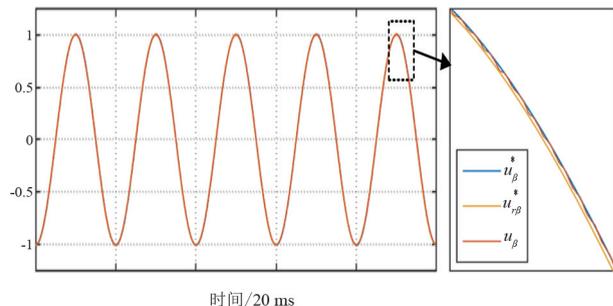
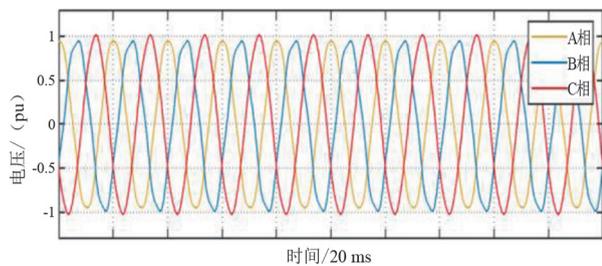
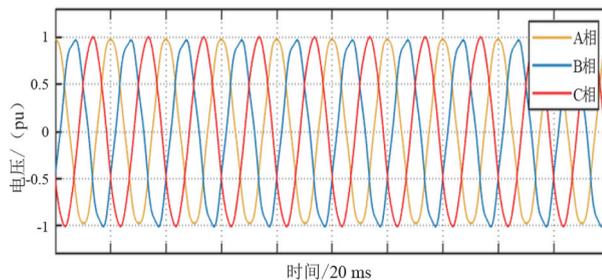


图 7 误差补偿控制下参考及实际输出移相电压波形

当在网侧注入总谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) 为 5% 的谐波电压时,变换器采用传统控制及误差补偿控制策略时的仿真波形如图 8 所示。



(a) 传统控制下三相输出电压波形



(b) 误差补偿控制下三相输出电压波形

图 8 单相网侧电压含有谐波时的仿真波形

对图 8(a)、(b) 所示的三相输出电压波形进行不平衡度分析,得到结果如表 2 所示。

表 2 输出三相电压不平衡度分析

控制策略	网侧电压	三相电压/V		不平衡度/%
		有功分量	无功分量	
传统控制	理想	305.06	7.818	2.563
	含谐波	304.98	7.852	2.575
误差补偿控制	理想	308.94	0.054	0.017
	含谐波	308.87	0.085	0.028

由表 2 可知,当变换器移相侧采用传统控制时,系统输出三相电压的不平衡度在理想网侧电压和含谐波网侧电压的条件下分别为 2.563% 和 2.575%,超过国家标准规定限值 2%;而当变换器移相侧采用所提误差补偿控制时,输出电压不平衡度在理想网侧电压和含谐波网侧电压的条件下分别为 0.017% 和 0.028%,远低于国家标准规定的限值。由此可证,所提误差补偿控制策略能有效降低系统输出电压的三相不平衡度。

4 动态响应功能仿真

为便于分析,在不考虑储能单元充放电的情况下对所提系统的动态响应功能进行验证,主要包含:单/三相电压变换功能、串联变换器双输出功能及电压补偿功能、并联变换器电流补偿及光伏功率传递

功能。仿真设定工作事件如表 3 所示。

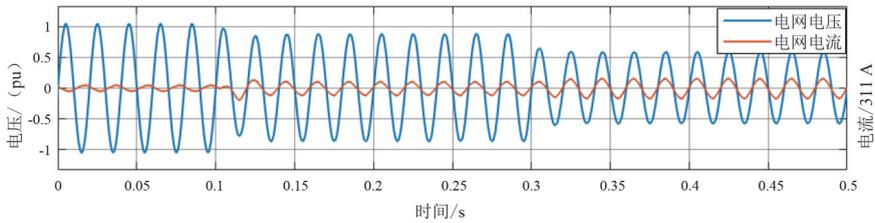
表 3 单/三相变换系统仿真的工作事件

时间/s	工作事件
0.1	三相负载侧并入负载 2 kW(不可控整流桥, $P_L \approx 6.2$ kW)
0.3	单相电网发生电压跌落 ($R_{MS} = 50$ V)

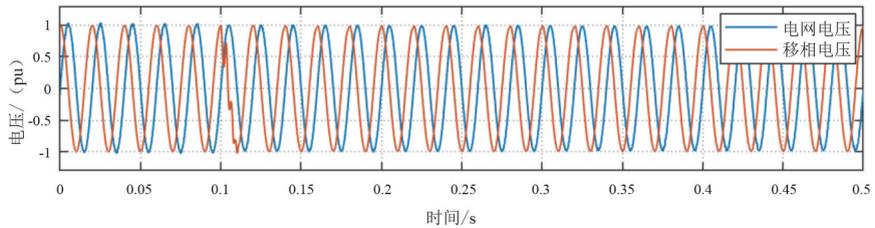
设定仿真时间为 0.5 s,初始阶段系统接入功率为 2 kW 的阻感性负载,且光伏单元运行于标准工况(光照强度为 1000 W/m²,工作温度为 25 °C)时最大输出功率约为 4.2 kW,仿真结果如图 9—图 11 所示。

图 9 展示了单/三相变换系统电压变换的电压电流仿真波形及负载电压的三相不平衡度曲线。在三相负载侧并入非线性负载时,三相负载侧电流的基波分量和谐波分量均增加,使得供电网线路中的电流增加,进而导致供电网压降增加,电压跌落至 0.85 pu 附近,移相电压在约 0.02 s 内恢复正常,负载端输出平衡的三相电压;当供电侧进一步发生 $R_{MS} = 50$ V 的电压跌落时,网侧电压跌落至 0.6 pu 附近。

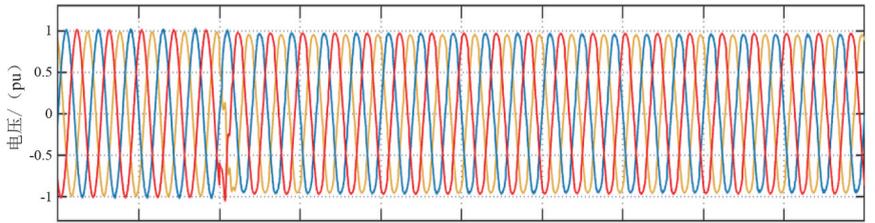
系统补偿网侧电压及电流的仿真波形如图 10



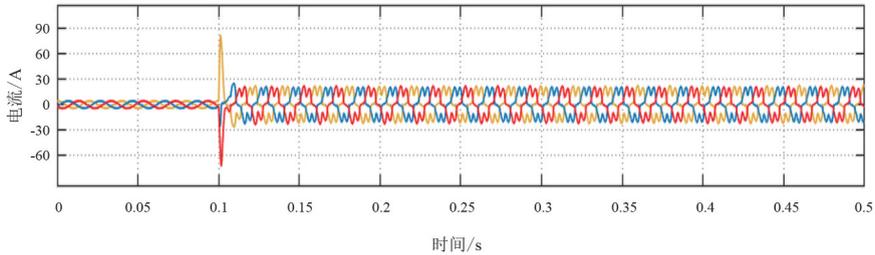
(a) 单相网侧电压、电流波形



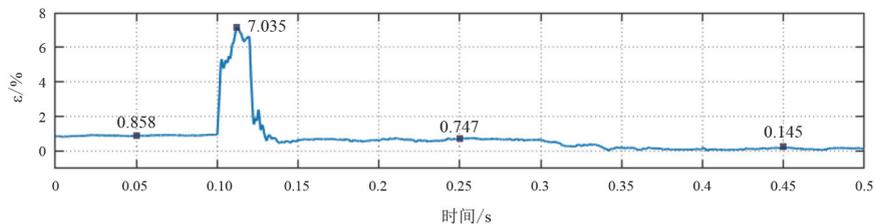
(b) 网侧电压及移相电压波形



(c) 三相负载电压、电流波形



(d) 电网电流补偿波形



(e) 电网电流补偿波形

图 9 单/三相变换系统电压变换仿真波形

所示。由图 10(a)可知,无论网侧电压 u_s 是低于还是高于额定电压,串联变换器都能迅速输出补偿电压 u_{dvr} ,使得 α 相端口电压 u_α 始终维持标称水平,并且在 u_{dvr} 变化过程中, u_β 始终输出稳定的正弦移相电压。

供电侧电流补偿波形如图 10(b)所示,在 0.1~0.5 s 期间系统负载侧接入非线性负载时,所产生的非线性电流分量通过逆 YNvd 平衡变压器传递到原边,使得原边 α 相电流 i_α 发生畸变。此时并联变换器在实现系统与供电网之间能量传递的基础上,同时向网侧提供了与 i_α 的非线性分量相等的补偿电流,消除了系统接入非线性负载时对供电网造成的谐波污染,使得供电侧电流为基本理想的正弦波,实现了对网侧电能质量的综合治理。

由图 11 所示的系统有功功率传递关系表明,在仿真过程中,光伏输出功率始终跟随最大输出点,约为 4.2 kW。在 0~0.1 s 期间,系统接入 2 kW 阻感性负载,此时 $P_{pv} > P_L$,光伏富余的功率通过并联变换器反送回供电网,此时网侧功率为负值;0.1~0.5 s 期间,由于负载侧并入了功率为 6.2 kW 的非线性负

载, $P_L > P_{pv}$,供电网与光伏单元共同为系统负载供能。在此过程中,系统能有效消纳光伏单元所发出功率。

通过仿真证明,所提新型单/三相变换系统能将单相变换为理想的三相电。在此基础上,由于所提系统能对供电侧的电能质量进行综合治理,使得原边 α 相电压始终处于标称水平,并避免系统对网侧电流造成污染。因此,所提系统能在单相网压偏离额定值、负载接入以及系统带非线性负载时均能实现单相电到三相电的变换。此外,该系统还能实现光伏能源的消纳作用,在一般情况下,光伏与供电网共同为负载供能;当光伏出力大于负载所需时,系统能将富余能量反送回供电网,实现光伏能源的有效利用。

5 结 论

上面从新型单/三相变换系统的拓扑结构及工作原理出发,以逆 YNvd 变压器为例,针对新型单/三

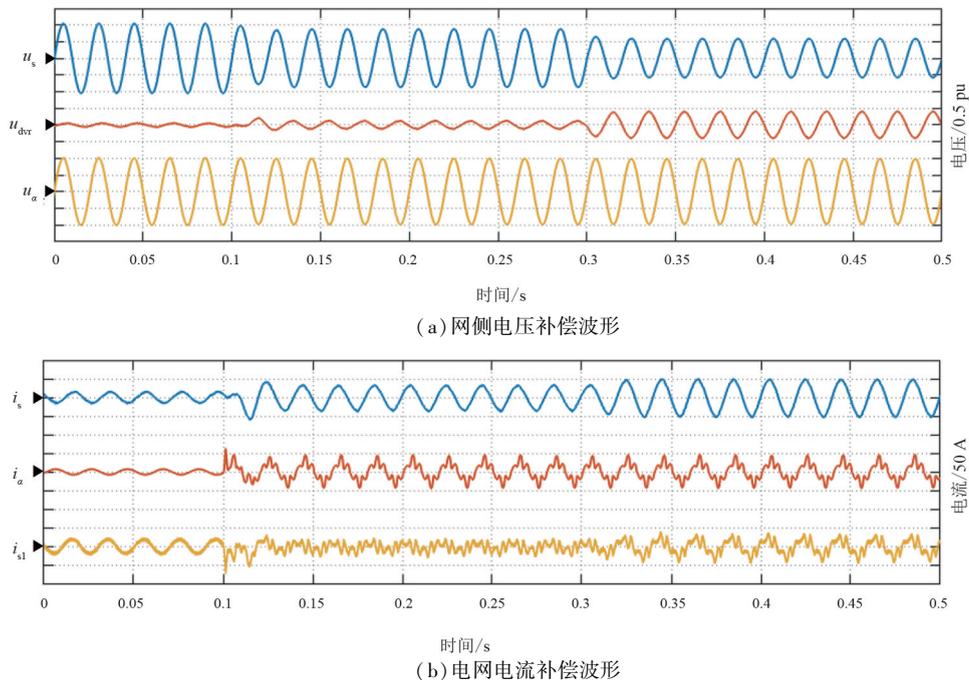


图 10 系统补偿网侧电压及电流的仿真波形

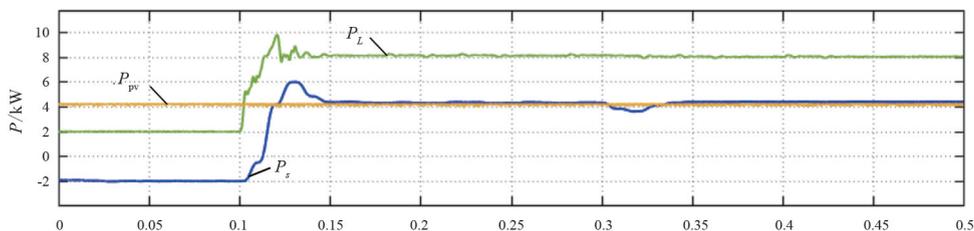


图 11 系统有功功率传递关系

(下转第 106 页)

[16] LIAO Wenlong, YANG Zhe, BAK-JENSEN Birgitte, et al. Simple data augmentation tricks for boosting performance on electricity theft detection tasks [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(4):4846-4858.

[17] FINARDI P, CAMPIOTTI I, PLENSACK G, et al. Electricity theft detection with self-attention[J].https://doi.org/10.48550.arXiv.2002.06219.

[18] ZHU Yuying, ZHANG Yang, LIU Lingbo, et al. Hybrid-order representation learning for electricity theft detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(2):1248-1259.

[19] 赵文清,沈哲吉,李刚.基于深度学习的用户异常用电模式检测[J].电力自动化设备,2018,38(9):34-38.

[20] 万磊,江锐,黄文杰,等.四阶段端到端的用户异常用电模式检测网络[J].中南民族大学学报(自然科学版),2023,42(1):82-87.

作者简介:

彭 军(1969),男,高级工程师,研究方向为营销电能计量;

李琪林(1973),男,正高级工程师,研究方向为电力大数据与人工智能;

周 尧(1990),男,副研究员,研究方向为人工智能;

袁 钟(1991),男,特聘副研究员,研究方向为异常检测及其应用;

彭德中(1975),男,教授,研究方向为人工智能;

刘益志(1994),男,工程师,研究方向为大数据分析。

(收稿日期:2023-08-23)

(上接第 38 页)

相变换系统输出三相电压不平衡问题,推导了单/三相变换系统在采用不同两相/三相变压器时的平衡变换条件,并分析了变压器绕组误差、移相电压输出误差及网侧电压波动对系统输出电压的影响。然后,针对由移相电压输出误差引起的三相不平衡问题,提出了一种基于参考电压重构的误差补偿控制策略。仿真结果表明,所提误差补偿策略能对输出移相电压进行补偿,从而有效降低系统输出电压不平衡度。

参考文献

[1] 尤志鹏.文蒙铁路引入蒙自铁路地区方案研究[J].交通与运输,2022,38(2):52-56.

[2] 佚名.国家电网扶贫成绩单[J].国家电网,2021(3):66-67.

[3] ZHU Y X, ZHUO F, SHI H T. Power management strategy research for a photovoltaic-hybrid energy storage system[C]. 2013 IEEE ECCE Asia Downunder, 2013:842-848.

[4] 傅丽.国外农村典型供电模式及建设运行维护经验[J].电力与电工,2013,33(4):80-82.

[5] 尹刚志.农网台区电能质量综合治理技术研究[J].电工技术,2018(21):118-121.

[6] 郭爱平.用于牵引变电所自用电系统的单相-三相变换器研究[D].成都:西南交通大学,2017.

[7] 庄岩.铁路单-三相供电系统设计[D].成都:西南交通大学,2011.

[8] 詹广振.牵引变电所 27.5kV 所用电系统谐波抑制技术研究[J].电气化铁道,2019,30(5):46-50.

[9] 佚名.增量配电网业务新政出台,鼓励可再生能源就近消纳[J].节能与环保,2018(4):34.

[10] 王淑娟,景芳毅.从度电成本分析光伏平价的路径[J].太阳能,2016(8):9-16.

[11] KHOSRAVI F, AZLI A N, KAYKHOSRAVI A. Design of a reduced component count single-phase to three-phase quasi-z-source converter[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(3):489-495.

[12] ALMEIDA Antonio D D, ROCHA Nady, FABRICID Edgard L L, et al. Singlephase to three-phase ac-dc-ac converter based on cascaded transformers rectifier and open-end winding induction motor[C]. 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). IEEE, 2019:1-6.

[13] 朱永强,贾利虎,谢文超,等.一种用于单相/三相变换的新型电力电子变换技术[J].电工技术学报,2018, 33(7):1433-1439.

[14] 康鹏,郭伟,黄伟钢,等.区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J].电测与仪表,2020,57(24):1-12.

[15] 杨明,鲍靖雯,高龙将,等.基于参考电流型光伏发电系统变功率输出控制策略[J].电力系统保护与控制, 2019,47(20):104-111.

[16] PILLAI D S, RAM J P, CHIAS A M Y M, et al. An accurate, shade detection-based hybrid maximum power point tracking approach for PV systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6594-6608.

作者简介:

李蓉蓉(1994),女,硕士,工程师,研究方向为电力储能系统的经济性分析;

左 为(1989),女,工程师,研究方向为营销市场化管理技术;

冉念洁(1994),女,硕士,从事电力系统提质增效工作;

周 苏(1995),女,硕士,从事电力营销系统分析工作;

王心仪(1997),女,硕士,研究方向为电力系统单相三相变流器控制技术。

(收稿日期:2024-01-08)