

面向多能源系统的配网分割算法研究

李成丰*, 燕 豪*, 胡孟晋, 代广贵, 刘 剑, 罗 欢

贵州电网有限责任公司毕节供电局, 贵州 毕节

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月8日; 发布日期: 2024年11月14日

摘 要

本文针对理想变压器(ITM)出现的接口数据传输延时问题, 提出一种适用于多能源系统的配网分割算法。由于分割模型的延时会在时域上引发交流信号的偏移, 进而在频域内造成其相位的变化, 因此, 本文根据Fourier分解设计出在三相交流系统电气量相位差进行接口信号的延时补偿, 对串行计算中的电压型ITM接口, 获取各相电压信号进行Fourier分解, 提取出基波和主要谐波的幅值与相位; 然后, 对提取出的分量, 分别计算出因接口延时而产生的相位延迟误差; 获得相位误差延迟后, 根据电压信号的基波及主要谐波量的相位, 得出由接口延时导致的总体相位偏移, 利用这些幅值数据、相位信息及系统频率, 重新合成电压信号; 最终, 将重新合成的电压信号作为受控源的输入, 进而实现接口延时的补偿。最后在Simulink中搭建了仿真模型, 验证了该方法的正确性和有效性。

关键词

模型分割, 配电网, ITM转换算法, Fourier分解

Research on Distribution Network Segmentation Algorithm for Multi-Energy Systems

Chengfeng Li*, Hao Yan*, Mengjin Hu, Guanggui Dai, Jian Liu, Huan Luo

Bijie Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Bijie Guizhou

Received: Oct. 15th, 2024; accepted: Nov. 8th, 2024; published: Nov. 14th, 2024

Abstract

Aiming at the problem of interface data transmission delay in ideal transformer (ITM), this paper

*共一作者。

文章引用: 李成丰, 燕豪, 胡孟晋, 代广贵, 刘剑, 罗欢. 面向多能源系统的配网分割算法研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 5942-5949. DOI: 10.12677/mos.2024.136542

presents a distribution network segmentation algorithm suitable for multi-energy systems. Because the delay of the segmentation model will cause the AC signal to shift in the time domain, and then cause the phase change in the frequency domain, this paper designs the delay compensation of the interface signal in the three-phase AC system based on the Fourier decomposition, and performs Fourier decomposition on the voltage ITM interface in the serial calculation to obtain the voltage signal of each phase. The amplitudes and phases of fundamental and main harmonics are extracted. Then, the phase delay errors caused by interface delay are calculated for the extracted components. After the phase error delay is obtained, the overall phase shift caused by the interface delay is obtained according to the phase of the main harmonics of the voltage signal, and the voltage signal is synthesized by using these amplitude data, phase information and system frequency. Finally, the synthesized voltage signal is used as the input of the controlled source to compensate the interface delay. Finally, a simulation model is built in Simulink to verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

Keywords

Model Segmentation, Distribution Network, ITM Conversion Algorithm, Fourier Decomposition

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今快速发展的科技领域中, 新能源作为推动可持续发展的重要力量正逐渐受到全球关注。随着新能源如太阳能和风能的大规模应用, 电力系统面临着更高效、更稳定的供电需求[1]。而配电网作为连接不同规模能源的桥梁, 在这个过程中扮演着至关重要的角色[2]。

对于配电网的有效管理和优化设计, 模型分割等先进技术的引入显得尤为重要。通过模型分割技术, 我们可以更好地理解复杂的电力系统结构, 提高电网运行效率, 并实现对新能源的灵活调度和管理。其中, 理想变压器(ITM) [3]作为一种具有高转换效率 and 低损耗的新能源变压器, 为提升电力系统性能提供了更加可靠和节能的选择。本文将在探讨新能源应用背景下, 结合模型分割技术和理想变压器(ITM)的特点, 探讨如何通过优化配电网的设计与管理, 实现对新能源的最大化利用和智能调控。通过深入研究和分析, 将为未来电力系统的可持续发展和智能化提供新的思路 and 方向。

理想变压器模型(ITM)法基于电路原理中的替代定理, 实现大系统的模型分割。理想变压器法分网灵活, 便于实现, 但接口运行条件必须满足一定的稳定特性条件。文献[4]在 ITM 法的基础上, 选择在物理侧串入电抗器, 以解决稳定性问题, 但该方法在增加成本的同时会降低仿真精度。文献[5]推导了串行电压型 ITM 接口的稳定性判据, 由于采用并行算法才能使系统分核运行, 减少仿真时间及进行硬件在环仿真, 所以, 并行算法是进行下一步实验操作的关键一环。文献[6]加入了虚拟电阻和虚拟阻抗对 ITM 的反馈电流进行补偿。文献[7]提出了利用形式的转换提高系统稳定性, 提出了 ITM 接口转换算法。

随着新能源不断接入电力系统, 其间歇性与波动性给电网带来挑战。Fourier 分解能为其发挥重要作用, 可精准分析新能源电力信号的频率特性。比如, 识别谐波成分并采取滤波手段。在故障诊断方面, 一旦系统故障, 它能快速分析故障信号频率特征, 锁定故障点, 提高系统可靠性与恢复速度。因此, 本文在 ITM 分割的多能源系统中利用 Fourier 分解, 对产生的接口延时误差进行补偿。当系统发生故障时, 故障过程中的电压电流量变为非周期分量, 即可利用电气量相位差进行接口信号的延时补偿。仿真结果

证明了该方法的正确性和有效性。

2. 风力发电机组建模

实际多能源系统仿真案例以永磁同步直驱风力发电机进行建模, 如图 1 为永磁同步直驱风力发电系统[8], 风力发电系统建模主要包括永磁同步机和空气动力系统, 其中机侧整流器和网侧逆变器主要由电力电子元件组成。

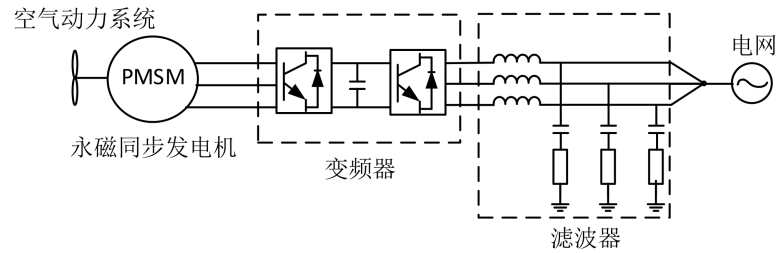


Figure 1. Direct drive wind power system
图 1. 直驱风力发电系统

数学建模是对风能转换为机械能过程的精确数学描述。量化和解析这一能量转换的数学公式为:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p \quad (1)$$

式中 ρ 为空气密度; r 为空气动力系统叶片半径(m); v 为叶尖来风速度; C_p 为风能转换效率, 其表达式为:

$$C_p = f(\alpha, \beta) \quad (2)$$

其中 α 和 β 分别为叶尖速比和叶桨距角, 式(2)中叶尖速比 α 定义为:

$$\alpha = \frac{\omega r}{v} \quad (3)$$

式中 ω 为机械角速度。

风力发电机的风能转换效率 C_p 是一个复杂而多变的参数, 受到多个因素的共同影响, 包括桨距角 β 、叶尖速比 α 。通过灵活调整桨距角, 能使空气动力系统保持高效的风能转换效率。然而, 相较于桨距角确定的风力发电机, 其风能转换率的优化则受到较大的限制, 只能在某一特定的风速条件下实现最大效率。对于恒频/变速的发电机组来说, 其风能转换率为:

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\Gamma} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{21}{\Gamma} + 0.0068\alpha} \quad (4)$$

其中,

$$\Gamma = \frac{1}{\frac{1}{\alpha + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}} \quad (5)$$

永磁同步电机的建模过程, 按照常用的电机建模坐标系下的 dq 坐标系进行建模, 则永磁同步电机的数学模型公式如下:

$$v_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \omega L_q i_q \quad (6)$$

$$v_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - p\omega(L_d i_d + \theta) \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_e) \quad (8)$$

$$T_e = 1.5p[(L_d - L_q)i_d i_q + \theta i_q] \quad (9)$$

式(6)中 v_d 、 i_d 、 L_d 为 d 轴的电压、电流及电感；式(3)中 v_q 、 i_q 、 L_q 为 q 轴的电压、电流及电感；式(7)中 ω 为转子机械转速； R 为定子绕组电阻； θ 为转子的磁通； p 为极对数；式(8)中 T_m 和 T_e 分别表示机械转矩和电磁转矩。式(6)和式(7)为永磁同步电机在 d 轴和 q 轴的电压 - 磁链方程；式(8)为同步电机转子机械运动方程；式(9)为电磁转矩方程。

电机模型的数学特性可以通过传递函数的表达式来呈现，进一步，利用控制元件的拓扑连接，揭示元件间的数学关系。接着，依据替代定理，将这些关系转换为受控源的形式，以便与其他电气部分实现连接，最终得到一个完整的等效电路，如图 2 所示。

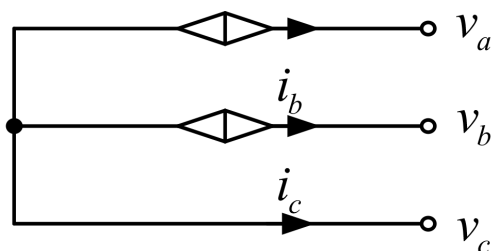


Figure 2. Permanent magnet synchronous motor equivalent circuit
图 2. 永磁同步电机等效电路

利用测量的三相电压输入的 v_a 、 v_b 、 v_c 通过派克变换得到输入的 v_d 、 v_q ，进一步计算得到 i_d 、 i_q 进行 dq0 反变换得到三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 返回至电力系统中。图 3 为风电系统基本结构、图 4 为永磁同步电机控制系统模型图。

如图 4 所示为同步机的控制示意图，输入数据为电气系统测量的三相电压 v_a 、 v_b 、 v_c 。三相电压数据经 dq 变换为 v_d 、 v_q ，进一步输出受控电流 i_d 、 i_q 。

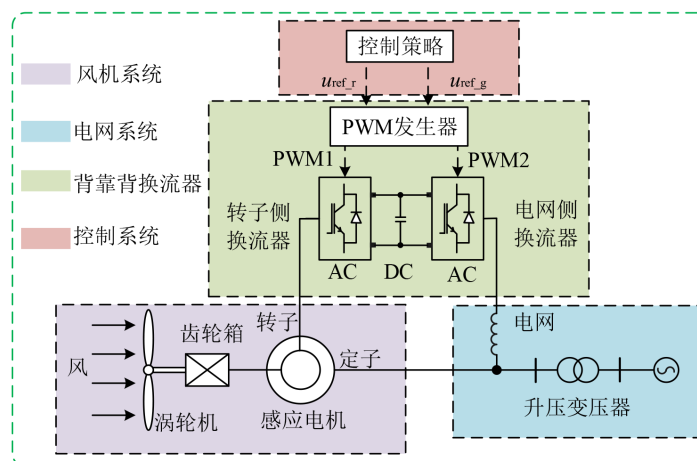


Figure 3. Basic structure of wind power system
图 3. 风电系统基本结构

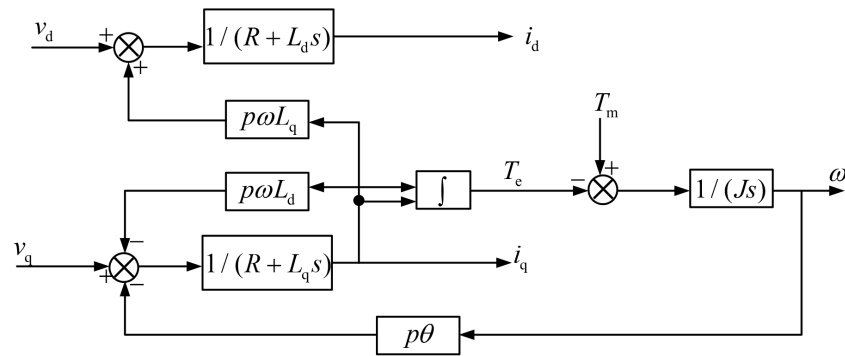


Figure 4. Permanent magnet synchronous motor control system
图 4. 永磁同步电机控制系统

3. 多能源系统中配网接口算法改进

ITM 算法的优点在于原理简单, 易于电路的分割; 缺点是接口算法的稳定性取决于阻抗 Z_1 和 Z_2 的值, 不同的多能源子系统中阻抗值的大小不同, 会导致系统的稳定性变差, 在一定程度上限制了该算法的应用范围。本文针对 ITM 用多能源系统出现的接口数据传输延时问题, 提出一种适用于多能源系统配网分割算法。

3.1. 配网接口算法优化策略

Fourier 分解

分割模型的延时会在时域上引发交流信号的偏移, 进而在频域内造成其相位的变化, 根据 Fourier 分解设计出在三相交流系统电气量相位差进行接口信号的延时补偿[9]。如图 5 所示, 对串行计算中的电压型 ITM 接口, 获取各相电压信号进行 Fourier 分解, 提取出基波和主要谐波的幅值与相位; 然后, 对提取出的分量, 分别计算出因接口延时而产生的相位延迟误差; 获得相位误差延迟后, 根据电压信号的基波及主要谐波量的相位, 得出由接口延时导致的总体相位偏移, 利用这些幅值数据、相位信息及系统频率, 重新合成电压信号; 最终, 将重新合成的电压信号作为受控源的输入, 进而实现接口延时的补偿。

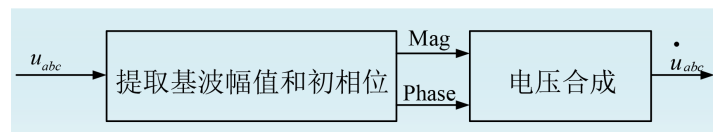


Figure 5. Diagram of voltage decomposition and synthesis
图 5. 电压分解与合成示意图

图 5 为电压传输路径上增加基波幅值(Mag)和初相位(Phase)分解环节, 以及电压合成环节, 其中, 分解环节从初始三相电压信号 u_{abc} 中提取出基波幅值和相位, 合成电压环节主要是根据提取的参数, 重新合成三相电压 $\dot{u}_{abc}$ 。

3.2. 算法的具体构建与实现

3.2.1. 基波幅值和初相位的分解

根据图 6 的原理框图来求解待测量的波形和初相位。

由图 6 可以看出, 待测量信号首先分别与某一个正弦波和余弦波相乘, 然后对其求平均值, 从而得到待测量信号的实部(Re)和虚部(Im)值。最后根据求解复数的方法求出幅值和初相位。假定待求电压信号

表达式表示为: $u(x) = A \sin(\omega t + \varphi)$, 其中 A 为幅值, ω 为角频率, φ 为初相位。将其分别与某一正弦波和余弦波的乘积, 由余弦函数得:

$$\begin{cases} A \sin(\omega t + \varphi) \cdot B \sin(\omega t) = \frac{AB}{2} \cos(\varphi) - \frac{AB}{2} \cos(2\omega t + \varphi) \\ A \sin(\omega t + \varphi) \cdot B \cos(\omega t) = \frac{AB}{2} \sin(\varphi) + \frac{AB}{2} \sin(2\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (10)$$

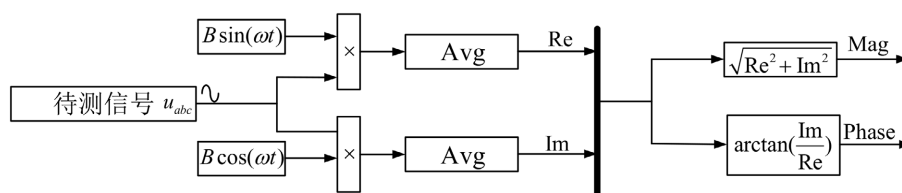


Figure 6. Voltage base wave amplitude and initial phase solution schematic diagram

图 6. 电压基波幅值和初相位求解原理图

对式(10)求平均值, 于是可得到带测量信号的实部与虚部:

$$\begin{cases} \text{Re} = \frac{AB}{2} \cos(\varphi) \\ \text{Im} = \frac{AB}{2} \sin(\varphi) \end{cases} \quad (11)$$

因此得, 待测量信号的幅值和相位分别为:

$$\begin{cases} \text{Mag} = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} = \sqrt{\left(\frac{AB}{2} \cos(\varphi)\right)^2 + \left(\frac{AB}{2} \sin(\varphi)\right)^2} = \frac{AB}{2} \\ \text{Phase} = \arctan\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) = \arctan\left(\frac{\frac{AB}{2} \sin(\varphi)}{\frac{AB}{2} \cos(\varphi)}\right) = \varphi \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知, 当 $B=2$ 时, 求得的结果刚好为待求量信号幅值, 于是在求取幅值与初相角时, 取正弦波和余弦波的幅值为 2。

3.2.2. 三相电压的合成

进一步根据求取的基波电压幅值和初相位, 可以重构三相电压信号, 如图 7 所示。

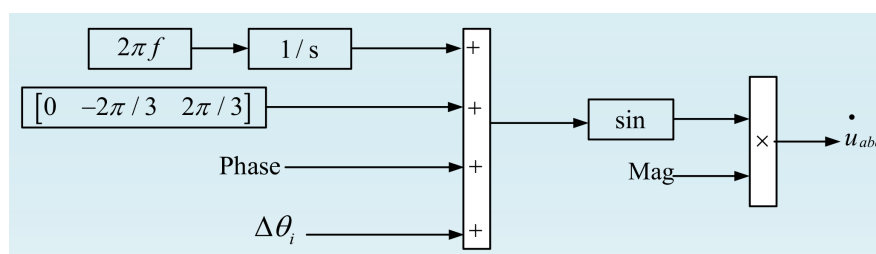


Figure 7. New voltage signal synthesis diagram

图 7. 新电压信号合成图

图 7 中 $\Delta\theta_i$ 为单位延时补偿, 其计算公式为:

$$\Delta\theta_i = \frac{2\pi T_s}{T} \quad (13)$$

式中, T_s 为仿真步长, T 为交流电压的周期。进一步可得合成的电压为:

$$\begin{cases} \dot{u}_a = A \sin(\omega t + \varphi + \Delta\theta_i) \\ \dot{u}_b = A \sin\left(\omega t + \varphi + \Delta\theta_i - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \dot{u}_c = A \sin\left(\omega t + \varphi + \Delta\theta_i + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (14)$$

4. 仿真验证

在 Simulink 中搭建阻感串联电路使用改进后的配网接口算法对其分割, Fourier 分解选取的谐波次数为 7 次, 角频率为 $\omega = 100\pi$, 电源电压为 $E(t) = 220 * \sqrt{2} \sin(\omega t)$ 。如图 8 为分解补偿基波原理图, 图 9 为原信号、补偿后信号、延时后信号波形对比。

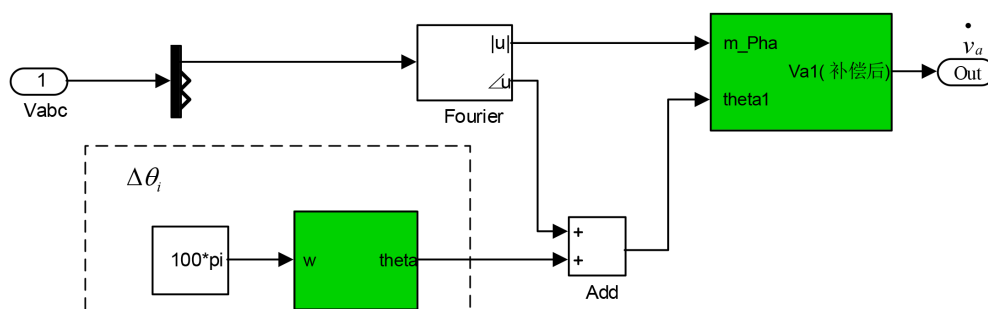


Figure 8. Fourier decomposition fundamental diagram

图 8. Fourier 分解基波原理图

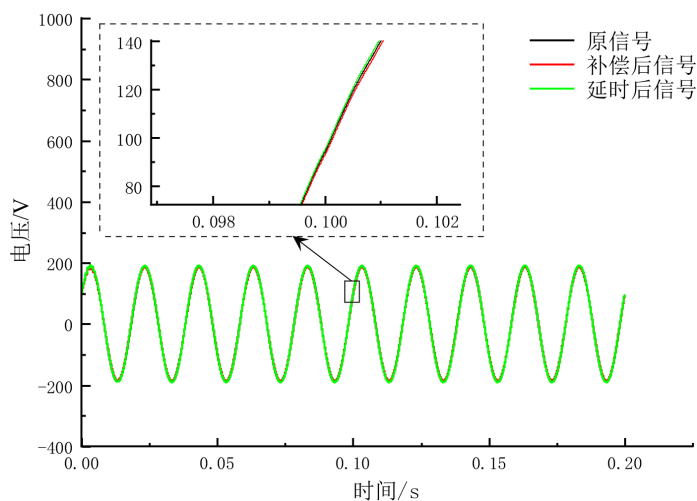


Figure 9. A-phase interface voltage waveform

图 9. A 相接口电压波形

由图 9 可知使用 ITM 分割的多能源系统中, 对产生的接口延时误差, 不仅可以在稳态条件下补偿, 同样可以在暂态下进行补偿。即当系统发生故障时, 故障过程中的电压电流量变为非周期分量, 同样可以用电气量相位差进行接口信号的延时补偿。

通过图 10 中 220 kV 侧分割前后的电压、电流以及功率波形的分析, 经过短暂的过渡过程, 功率逐渐稳定在 1154 MW。

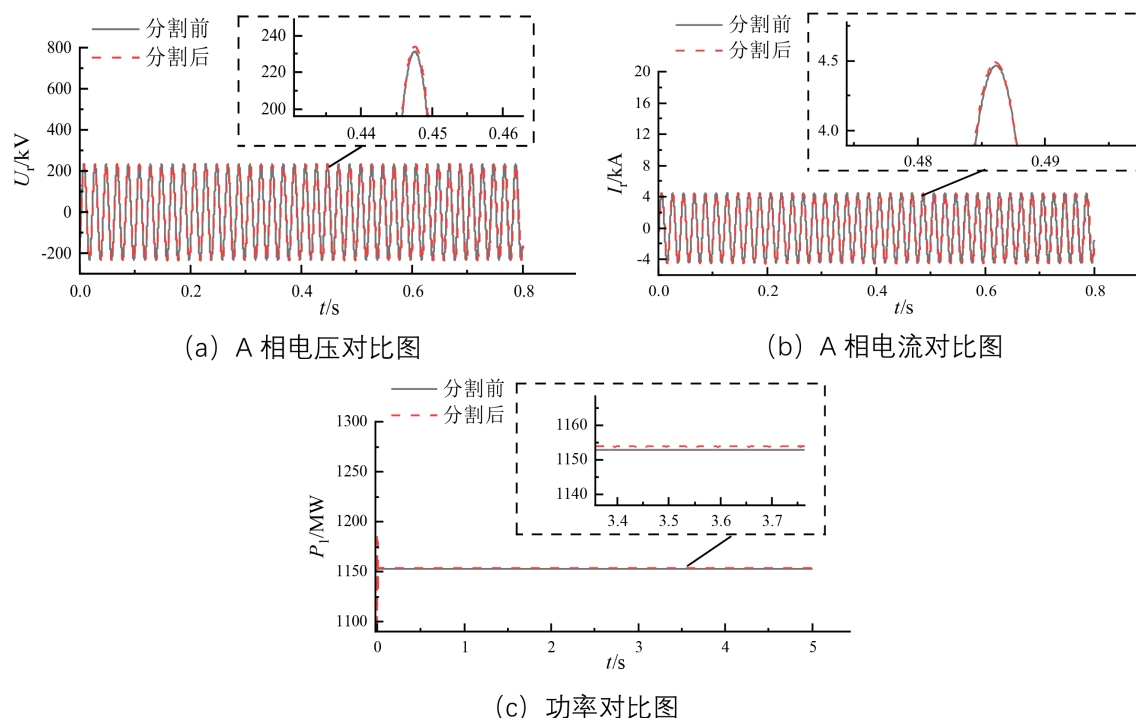


Figure 10. Voltage, current and power waveform before and after 220 kV side division
图 10. 220 kV 侧分割前后的电压、电流以及功率波形

5. 结论

本文在 ITM 分割的多能源系统中利用 Fourier 分解, 对产生的接口延时误差进行补偿。由仿真结果可知, 该方法不仅可以在稳态条件下进行补偿, 同样可以在暂态下进行补偿, 当系统发生故障时, 故障过程中的电压电流量变为非周期分量, 即可利用电气量相位差进行接口信号的延时补偿。通过对 220 kV 侧分割前后的电压、电流以及功率波形的补偿分析, 证明了该方法的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 鞠平, 周孝信, 陈维江, 等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 2-11.
- [2] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.
- [3] 杜燕, 樊振东, 杨向真, 等. 功率硬件在环仿真系统的建模与稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 290-298.
- [4] 杨向真, 孙麒, 杜燕, 等. 功率硬件在环仿真系统性能分析[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 251-262.
- [5] 孙麒. 功率硬件在环仿真系统接口算法研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [6] 蔡海青, 张建设, 滕亚青, 等. 光伏微网系统功率硬件在环仿真接口算法研究[J]. 电气自动化, 2016, 38(2): 37-40.
- [7] 刘飞. 电力系统仿真模型分割及接口算法研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [8] 张恩琦, 于思洋, 王皓, 等. 风力发电机的发展及应用综述[J/OL]. 电气工程学报, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20240809.1012.002.html>, 2024-11-11.
- [9] 赵朗程, 陈卓, 郝正航, 等. 新型省级电网电磁暂态实时仿真建模方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(8): 46-55+73.