

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220077

光伏快速充电站配电变压器端电能质量综合控制研究

车伟¹, 陈洁¹, 胡亚杰², 尹惠¹, 刘岚¹, 王思尹²

(1. 配电变压器节能技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100080;

2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对光伏快速充电站将光伏发电与电动汽车快速充电站有机结合, 在充分发挥清洁能源优势和大量提升充电效率的同时所带来的电能质量扰动类型复杂、变化快速等问题, 提出了一种基于串并联组合配电网柔性交流输电(distribution flexible AC transmission system, DFACTS)的新型电能质量补偿器的电能质量综合控制方法。深入研究了新型电能质量补偿器主电路拓扑, 建立起了动态工作模型。详细分析了新型电能质量补偿器线性自抗扰控制方法的工作原理, 设计出线性自抗扰控制器。并针对各 DFACTS 控制器间的交互影响, 提出多 DFACTS 控制器的协调控制策略。最后搭建仿真模型, 进行仿真验证。仿真结果表明, 所提出的新型电能质量补偿器采用线性自抗扰控制方法相比传统 PI 控制方法, 提高了电能质量扰动快速变化时的综合补偿能力和动态响应能力。并且验证了该协调控制能有效提高系统电压稳定能力, 具有良好的可行性和有效性。

关键词: 快速充电站; 光伏发电; 多 DFACTS 控制器; 线性自抗扰控制; 协调控制

Comprehensive control of power quality at the distribution transformer end of a photovoltaic fast charging station

CHE Wei¹, CHEN Jie¹, HU Yajie², YIN Hui¹, LIU Lan¹, WANG Siyin²

(1. Beijing Key Laboratory of Distribution Transformer Energy-Saving Technology (China Electric Power Research Institute), Beijing 100080, China; 2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: There are problems of complex power quality disturbance types and rapid changes caused by the organic combination of photovoltaic power generation and electric vehicle fast charging station while at the same time giving full play to the advantages of clean energy and greatly improving charging efficiency. Thus a power quality integrated control method for a new power quality compensator based on a 'series parallel combined' distribution flexible AC transmission system (DFACTS) is proposed. The main circuit topology of the new power quality compensator is studied and the dynamic working model is established. The working principle of the linear active disturbance rejection control method of the new power quality compensator is analyzed in detail, and a linear active disturbance rejection controller is designed. Given the interaction between DFACTS controllers, a coordinated control strategy of multiple DFACTS controllers is proposed. Finally, a simulation model is built for verification. The results show that the proposed new power quality compensator improves the comprehensive compensation ability and dynamic response ability of the rapid change of power quality disturbance with the help of a linear auto disturbance rejection control method. It compares well with the traditional PI control method. It is verified that the coordinated control can effectively improve the voltage stability of the system, and has good feasibility and effectiveness.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51708194 and No. 51507014).

Key words: fast charging station; photovoltaic power generation; multiple DFACTS controllers; linear active disturbance rejection control; coordinated control

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51708194, 51507014); 配电变压器节能技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司)开放基金项目资助(PDB51201901686); 湖南省教育厅科学研究重点项目资助(18A120)

0 引言

光伏快速充电站是一种含有光伏发电系统和电动汽车快速充电系统的微电网系统, 因能很好地将光伏发电与电动汽车快速充电站有机结合得到人们的关注^[1-2]。光伏快速充电站在充分发挥清洁能源优势和大量提升充电效率的同时, 带来的电能质量问题也不容忽视。文献[3]针对大规模光伏发电与电力系统间的相互影响, 分析其电压及电流特性, 表明当大规模光伏集中并网时, 可能出现电压大幅度波动和谐波电流超标的现象; 文献[4]针对快充电站进行研究, 表明快充电站功率需求大、随机性强、谐波含量高, 对电能质量提出更大挑战。故对光伏快速充电站进行电能质量综合控制是至关重要的。

随着柔性交流输电技术(flexible AC transmission systems, FACTS)在配电网的延伸, 近年来配电网柔性交流输电(distribution flexible AC transmission system, DFACTS)技术得到了大力发展, 这为光伏快速充电站的电能质量综合改善提供了新的有效手段。目前, DFACTS 的控制策略多是基于传统 PI 控制, 简便、直观但难以获得优秀的动态特性^[5-8]。

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)于 1998 年正式提出^[7]。该控制器不依赖于被控对象的准确模型, 适用于非线性的不确定研究对象, 具有较强的鲁棒性和动态性能, 但自抗扰控制的参数较多, 参数整定困难, 未能在工程上得到广泛应用。文献[9]提出线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC), 通过参数线性化并减少待调节参数, 解决了传统自抗扰控制调参困难的问题, 易于工程实现。

线性自抗扰控制在微网电能质量治理方面已有较多研究与应用。文献[10]基于线性自抗扰控制方法, 设计了并联型有源滤波器一阶线性自抗扰控制器, 验证了控制方案具有良好的跟踪效果和抗扰特性; 文献[11-13]基于线性自抗扰控制技术对逆变器输出电压进行控制, 使其对负载具有更强的鲁棒性; 文献[14-15]设计三阶线性自抗扰并网逆变器电流控制器, 实现了与电容电流反馈有源阻尼接近的谐振抑制目标; 文献[16]利用线性自抗扰控制作为整流器电压外环控制方案, 提高了系统的响应速度和精度; 文献[17]针对 DC/DC 变换器设计降阶线性自抗扰控制器, 减小系统超调量, 缩短调节时间。

本文针对光伏快速充电站的电能质量问题, 设计了一种基于新型串并联组合多 DFACTS 的电能质量综合补偿系统, 并对各 DFACTS 控制器进行

LADRC 设计和协调控制设计, 实现光伏快速充电站电能质量综合控制。最后通过搭建 Matlab/Simulink 仿真模型, 验证上述 LADRC 和协调控制方法的有效性。

1 多 DFACTS 控制器电能质量综合补偿系统的拓扑结构

由于光伏快速充电站内 DC/DC 转换器、整流器和逆变器中大量使用电力电子器件, 在运行时会使波形畸变, 带来严重的谐波污染; 而外界温度、光照和充电负荷的波动性, 会导致光伏充电站中出现电压波动现象; 当光伏充电站同时接入大量的充电桩, 负荷突然急剧增大, 或系统发生故障都会导致电压的短时暂降^[18-19]。若不适当控制光伏快速充电站自身所产生的电能质量问题, 必会对系统的稳定性造成影响^[20]。本文采用电能质量综合补偿系统治理光伏快速充电站电能质量问题。

图 1 为含多 DFACTS 控制器电能质量综合补偿系统的光伏快速充电站系统结构框图, 主要包含光伏发电系统、储能系统、电动汽车快速充电站和电能质量综合补偿系统, 其中电动汽车快速充电站包含快速直流充电桩和一些其他直流负荷。

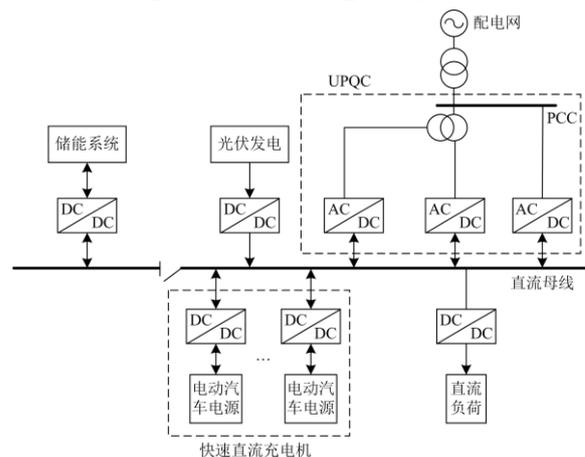


图 1 多电能质量综合补偿系统的光伏快速充电站系统结构框图

Fig. 1 System structure diagram of photovoltaic fast charging station with power quality compensation system based on multi-DFACTS

图 2 为多 DFACTS 电能质量综合补偿系统等效电路, 由并联 DFACTS 控制器 1、并联 DFACTS 控制器 2 和串联 DFACTS 控制器构成, 是一种并-串-并结构的组合型多 DFACTS 控制器。

如图 2 所示, 并联 DFACTS 控制器 1 并联接在光伏快速充电站侧, 通过发出与谐波电流和无功电

将式(3)写成式(4)所示的状态方程形式。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0 u_0 \\ \dot{x}_2 = h_0 \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_1 为系统输出; $y_1 = u_{aco}$; x_2 为系统的总扰动 f_0 ; h_0 为 f_0 的微分。

令 Z_1 为 x_1 的估计值, Z_2 为 x_2 的估计值, 根据式(4)建立如式(5)的二阶 LESO。

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2 - \beta_1(Z_1 - y) + b_0 u_0 \\ \dot{Z}_2 = -\beta_2(Z_2 - y) \end{cases} \quad (5)$$

当观测器参数 β_1 、 β_2 设置合适的数值, 能实现对 x_1 、 x_2 状态变量的实时跟踪。

因此, 串联 DFACTS 控制器电压功能外环的线性一阶自抗扰控制器结构如图 4 所示。

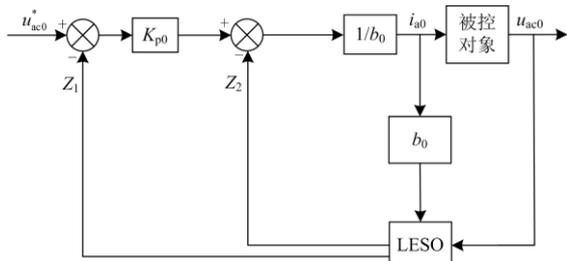


图 4 串联 DFACTS 控制器电压外环线性一阶自抗扰控制器

Fig. 4 Linear first-order active disturbance rejection controller with voltage outer loop of series DFACTS controller

2.2 并联 DFACTS 控制器数学模型及 LADRC 设计

并联 DFACTS 控制器 1 通过输出与谐波电流和无功电流大小相同方向相反的电流来进行谐波治理和无功补偿, 并联 DFACTS 控制器 2 通过输出给定的有功电流和无功电流之和的总电流来进行有功传输、无功传输和维持网侧电压稳定。其中, 谐波电流和有功电流由并联 DFACTS 控制器 1 和并联 DFACTS 控制器 2 分别输出, 无功电流优先由并联 DFACTS 控制器 2 输出, 不足部分由并联 DFACTS 控制器 1 输出。二者采用统一的检测电路检测出控制信号, 其中: 线路的谐波电流控制信号分配给控制器 1, 直流侧的光伏发电输出的有功电流控制信号分配给控制器 2, 电压稳定所需的无功电流控制信号分配给控制器 1 和控制器 2, 考虑到控制器 1 需要较高的开关频率来实现谐波电流输出、控制器 1 可以用相对较低的开关频率来实现有功电流输出, 无功电流控制信号分配的规则是优先由控制器 2 输出无功电流, 控制器 2 无功电流输出不足部分由控制器 1 输出。在 2 个并联控制器的控制信号确

定之后, 二者可以采取相同的控制策略。并联 DFACTS 控制器 1 和并联 DFACTS 控制器 2 均采用线性自抗扰控制对电感电流进行跟踪控制, 其设计原理类似, 故以并联 DFACTS 控制器 1 为例, 展示其 LADRC 设计原理。

以 a 相为例, 根据 KVL 和电路关系得到并联 DFACTS 控制器 1 和并联 DFACTS 控制器 2 的数学模型分别如式(6)、式(7)所示。

$$L_1 \frac{di_{a1}}{dt} + i_{a1} R_1 = u_{a1o} - u_{La} \quad (6)$$

$$L_2 \frac{di_{a2}}{dt} + i_{a2} R_2 = u_{a2o} - (u_{La} + u_{ac}) \quad (7)$$

式中, u_{a1o} 、 u_{a2o} 分别为 a_1 、 a_2 与 o 点之间的电压。

并联 DFACTS 控制器 1 的 LADRC 设计原理为

$$u_{a1o} = u_{a1N} + u_{No} \quad (8)$$

在一个工频周期内, 有 $u_{a1N} = S_{a1} \cdot u_{dc}$, 开关函数 S_{a1} 为

$$S_{a1} = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂开关闭合} \\ 0, & \text{下桥臂开关闭合} \end{cases} \quad (9)$$

且有

$$u_{No} = -\frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \quad (10)$$

根据式(8)一式(10), 式(6)可以写为

$$L_1 \frac{di_{a1}}{dt} + i_{a1} R_1 = \frac{1}{3} u_{dc} (2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1}) - u_{La} \quad (11)$$

式(11)可以写为

$$\frac{di_{a1}}{dt} = \frac{1}{3L_1} u_{dc} (2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1}) - i_{a1} \frac{R_1}{L_1} - \frac{u_{La}}{L_1} \quad (12)$$

以上方程中, S_{a1} 的取值为“0”和“1”, 为非连续的系统, 不便于分析。本文采用一个开关周期内的平均值代替瞬时值, 将离散模型连续化。

根据文献[20], 采用 SPWM 调制的变换器, 其开关函数的平均值为

$$\begin{cases} S_{a1} = \frac{1}{2}(m_1 \sin \omega t + 1) \\ S_{b1} = \frac{1}{2} \left[m_1 \sin \left(\omega t - \frac{2p}{3} \right) + 1 \right] \\ S_{c1} = \frac{1}{2} \left[m_1 \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + 1 \right] \end{cases} \quad (13)$$

b、c 相的开关函数相对 a 相而言, 只是依次滞后 120° 和 240°, 其中, m_1 为并联 DFACTS 控制器 1 的 SPWM 的调制比。

将式(13)代入式(12)得

$$\frac{di_{a1}}{dt} = -\frac{i_{a1}R_1 + u_{La}}{L_1} + \frac{u_{dc}}{3L_1} \cdot \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot m_1 \quad (14)$$

将其简化为

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = f_1 + b_1 u_1 \quad (15)$$

$$F_1 = i_{a1}, \text{ 系统总扰动 } f_1 = -\frac{i_{a1}R_1 + u_{La}}{L_1}, u_1 = m_1,$$

$$b_1 = \frac{u_{dc}}{3L_1} \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right].$$

由式(15)可知, 将并联 DFACTS 控制器 1 数学模型系统电感电流 i_{a1} 和负载侧电压 u_{La} 的波动量作为系统的总扰动, 通过线性扩张状态观测器进行实时估计, 并给予补偿。

令系统输出为 x_3 , 系统总扰动为 x_4 , x_4 的微分为 h_1 , $x_2 = y_2$, $y_2 = i_{a1}$, 式(15)的状态方程可写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_3 = x_4 + b_1 u_1 \\ \dot{\mathbf{x}}_4 = h_1 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (16)$$

令 Z_3 为 x_3 的估计值, Z_4 为 x_4 的估计值, 根据式(15)建立如式(17)的二阶 LESO。

$$\begin{cases} \dot{Z}_3 = Z_4 - \beta_3(Z_3 - y_2) + b_1 u_1 \\ \dot{Z}_4 = -\beta_4(Z_3 - y_2) \end{cases} \quad (17)$$

当观测器参数 β_3 、 β_4 设置合适的数值, 能实现对 x_3 、 x_4 状态变量的实时跟踪。

因此, 并联 DFACTS 控制器 1 的一阶线性自抗扰控制器结构如图 5 所示。

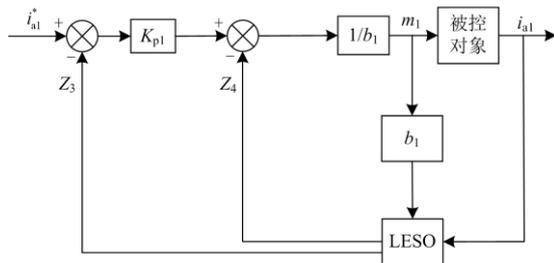


图 5 并联 DFACTS 控制器 1 的一阶线性自抗扰控制器
Fig. 5 The first-order linear active disturbance rejection controller of parallel DFACTS controller 1

$$i_{a1}^* = i_{ac1}^* + i_{c1} = i_{ac1}^* + C \frac{du_{C1}}{dt} \quad (18)$$

同理, 依据并联 DFACTS 控制器 1 的 LADRC 设计原理, 对并联 DFACTS 控制器 2 进行一阶线性自抗扰控制器设计, 得到如图 6 所示的并联

DFACTS 控制器 2 的一阶线性自抗扰控制器结构。

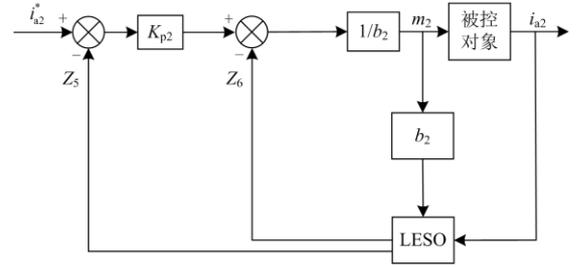


图 6 并联 DFACTS 控制器 2 的一阶线性自抗扰控制器
Fig. 6 The first-order linear active disturbance rejection controller of parallel DFACTS controller 2

其中, $F_2 = i_{a2}$, 系统的总扰动 $f_2 = -\frac{i_{a2}R_2 + u_{La} + u_{ac}}{L_2}$, $u_2 = m_2$, $b_2 = \frac{u_{dc}}{3L_2} \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) - \frac{1}{2} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right]$ 。

并且,

$$i_{a2}^* = i_{ac2}^* + i_{c2} = i_{ac2}^* + C \frac{du_{C2}}{dt} \quad (19)$$

3 多 DFACTS 控制器电能质量综合补偿系统的模糊优化协调控制策略原理

本文采用的 3 个不同功能的 DFACTS 控制器: 并联 DFACTS 控制器 1、并联 DFACTS 控制器 2 和串联 DFACTS 控制器。不同类型的 DFACTS 控制器在运行时存在交互影响, 且可能是负交互影响^[19]。例如, 调节串联 DFACTS 控制器的输出, 线路中的电压会发生变化, 会导致加在并联 DFACTS 控制器 1 和并联 DFACTS 控制器 2 上的电压发生变化, 进而影响并联 DFACTS 控制器 1 和并联 DFACTS 控制器 2 的输出电流, 降低 DFACTS 控制器 1 和并联 DFACTS 控制器 1 的控制效果。

为了消除 3 个 DFACTS 控制器的负交互影响, 达到更好的控制效果, 本文采用模糊优化方法进行协调控制, 基本思想是: 使用模糊综合评判对关键参数进行评判, 根据评判结果对参数协调优化, 实现并联 DFACTS 控制器 1、并联 DFACTS 控制器 2 和串联 DFACTS 控制器之间的协调控制。其具体过程如下:

1) 确定控制目标并设定各侧重目标权重值。本文选取系统的电压稳定能力为控制目标, 各 DFACTS 控制器参数为控制对象, 即将各 DFACTS 控制器的协调控制转变为控制各 DFACTS 控制器

参数, 提高系统电压稳定能力。首先对系统电压稳定能力的指标进行模糊评判, 需要确定能力评判的影响因子, 而评判系统电压稳定能力的指标可分为网侧电压稳定和负载侧电压稳定。则电压稳定能力的指标集 $U = \{\text{网侧电压稳定、负载侧电压稳定}\} = \{u_1、u_2\}$ 。为了反映每个因数的重要程度, 对每个因数赋予相应的权值, 其权重集 $\omega = \{\omega_1、\omega_2\}$ 。其中, $\omega_1、\omega_2$ 分别为 $u_1、u_2$ 的权值, 数值根据仿真实验经验与专家评估得到。

2) 确定侧重控制对象和评价矩阵。各 DFACTS 控制器中比例环节 K_P 起主导作用, 因此, 选取控制系统的比例参数 $K_{p0}、K_{p1}$ 和 K_{p2} 分别为控制对象串联 DFACTS 控制器、并联 DFACTS 控制器 1、并联 DFACTS 控制器 2 的关键参数。

取评价矩阵为

$$r = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, r_{ij} 表示只考虑第 i 种控制时, 第 j 个控制对象所占的权重, 它反映了各因数影响评判对象的程

度, 可以选取根据仿真结果进行评估得到的经验数据。

3) 利用模糊变换进行综合评价。

取模糊变换为

$$A = \omega \cdot r = (a_1, a_2, a_3) \quad (21)$$

式中: $a_j = \sum_{i=1}^2 \omega_i r_{ij}$, a 表示各控制对象对电压稳定能

力指标的影响因子; $\omega_1、\omega_2$ 分别为 $u_1、u_2$ 的权值, 其数值也可以根据仿真实验评估或专家经验得到。

4) 参数优化。通过改变最大影响因子所对应的关键参数能显著提高电压稳定能力。因此, 可以依据各关键参数对电压稳定能力指标的影响因子, 进行参数调整。参数调整的策略是: 增加最大影响因子值所对应的关键参数的数值, 保持较小和最小影响因子值所对应的关键参数的数值不变。

4 仿真与实验验证

搭建如图 7 所示的计算机仿真系统。计算机仿真系统的参数如下: 电网电压为 220 V; 频率为 50 Hz; 滤波电容为 $C_0 = 8.7 \mu\text{F}$, $C_1 = 6.7 \mu\text{F}$, $C_2 =$

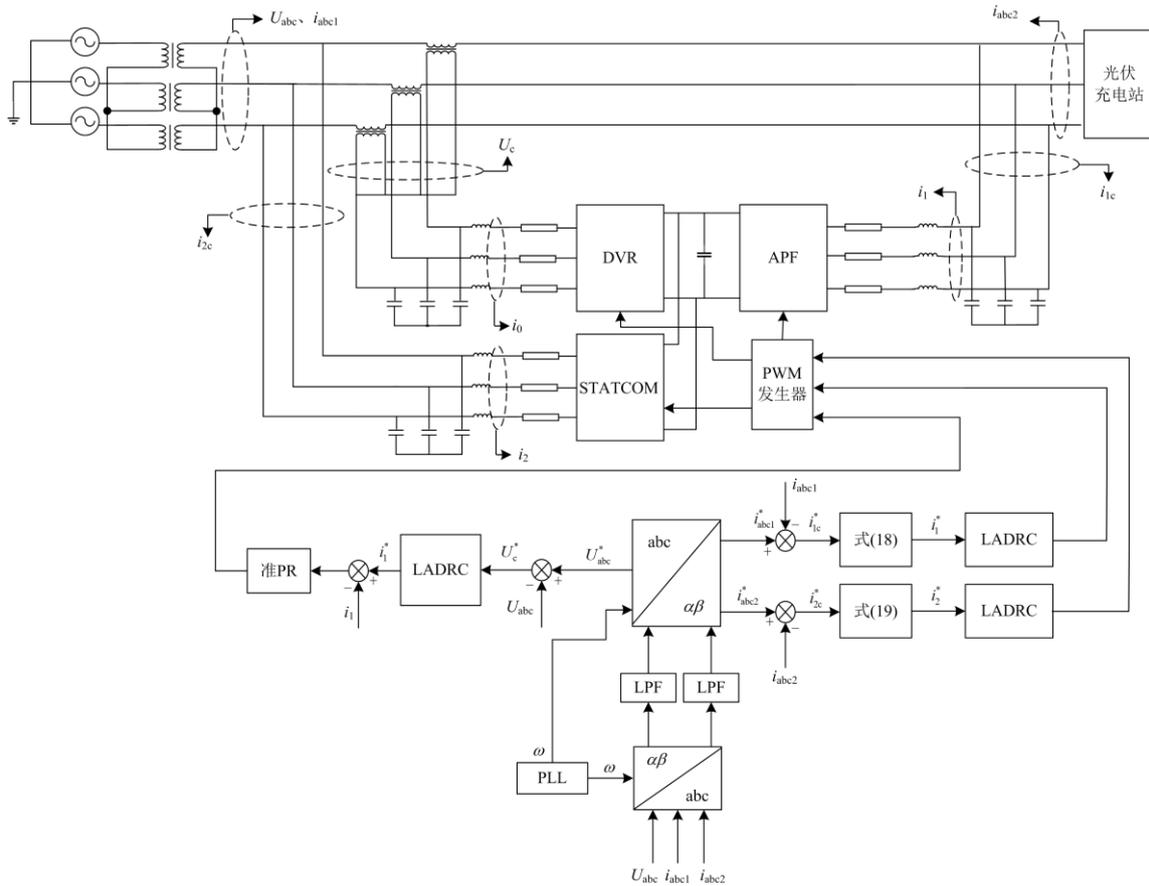


图 7 计算机仿真系统

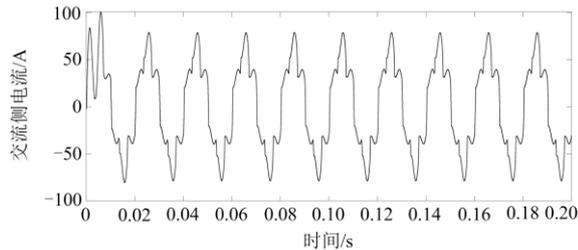
Fig. 7 Computer simulation system

10 μF ；滤波电感为 $L_0 = 3 \text{ mH}$ ， $L_1 = 1 \text{ mH}$ ， $L_2 = 2 \text{ mH}$ ；串联变压器变比为 1:1；直流侧电压 $u_{\text{dc}} = 800 \text{ V}$ 。其中 LADRC 参数如下： $\beta_1 = 2000$ ， $\beta_2 = 1000^2$ ， $\beta_3 = 7000$ ， $\beta_4 = 3500^2$ ， $\beta_5 = 6000$ ， $\beta_6 = 3000^2$ ； K_{p0} 、 K_{p1} 、 K_{p2} 预设分别为 3.7、1.8 和 9.5。

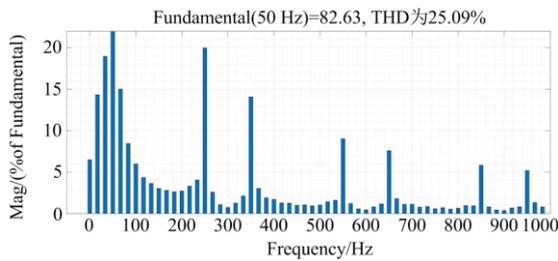
分别进行光伏快速充电站电能质量线性自抗扰输出控制策略的计算机仿真和 DFACTS 协调控制的计算机仿真，仿真结果如图 8—图 11 所示。

4.1 光伏充电站线性自抗扰输出控制策略的计算机仿真

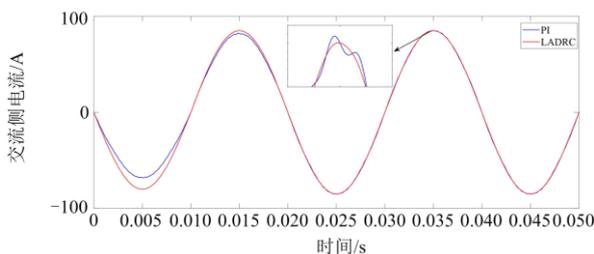
为了验证线性自抗扰控制策略对光伏快速充电站电流谐波的补偿效果，设置负载单元负载为不控整流充电机，共 10 台，其他负荷用电阻代替，得到的仿真波形如图 8 所示。由图 8(a)、图 8(b)可以看出，在光伏快速充电站运行时，交流侧电流波形发生明显的畸变，谐波畸变率为 25.09%，谐波污染严重。由图 8(c)、图 8(d)、图 8(e)可以看出，采用传统 PI 控制时，电流经过一个周期才趋于稳定，线性自抗扰控制仅需半个周期就能达到稳定，且经过线性自抗扰控制后的交流侧电流比经传统 PI 控制后的交流侧电流波形更接近正弦波，谐波畸变率更低，



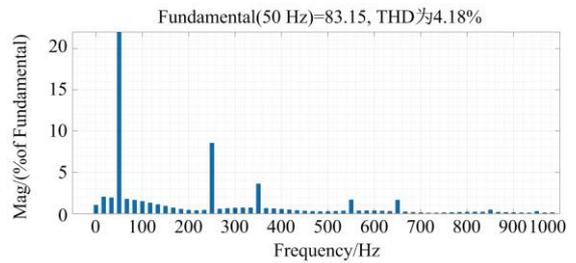
(a) 补偿前交流电流波形



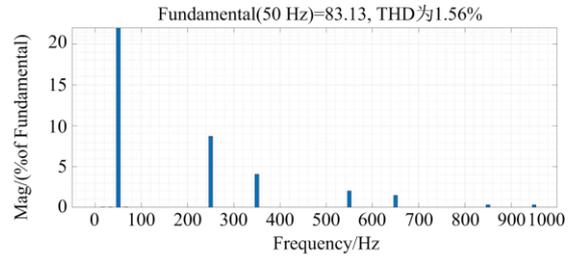
(b) 补偿前交流电流频谱



(c) 补偿后交流电流波形



(d) PI控制补偿后交流电流频谱



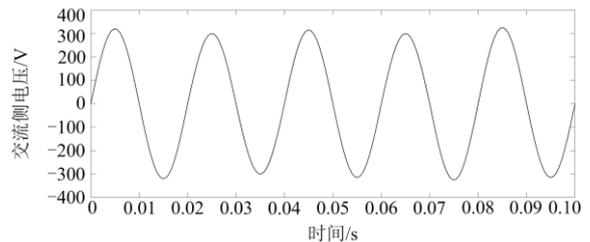
(e) 线性自抗扰控制补偿后交流电流频谱

图 8 充电站交流电流谐波补偿图

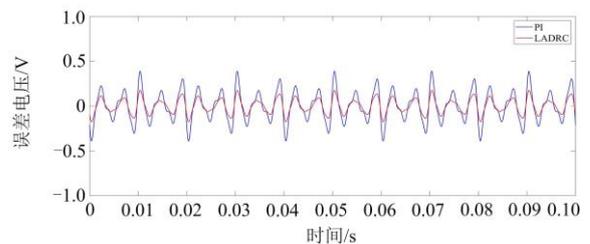
Fig. 8 AC current harmonic compensation diagram of charging station

采用线性自抗扰控制补偿后的交流侧谐波畸变率为 1.56%，采用传统 PI 控制补偿后的交流侧谐波畸变率为 4.18%。

为了验证线性自抗扰控制策略对电压波动的补偿效果，加大外界光照变化的幅度，增大出力的波动性，使得光伏出力不稳定，得到的仿真波形如图 9 所示，其中图 9(a)、图 9(b)分别为补偿前电压波



(a) 补偿前电压波形



(b) 电压跟踪误差

图 9 充电站电压波动补偿图

Fig. 9 Voltage fluctuation compensation diagram of charging station

形和电压跟踪误差。可以看出, 由于光伏快速充电站内光伏发力和负荷的波动性使得电压出现小幅度的波动, 而采用线性自抗扰控制补偿得到的电流波形与参考电压波形误差在 0.2 V 内, 小于采用传统 PI 控制的 0.5 V 误差, 具有更好的控制效果。

为了验证线性自抗扰控制策略对电压暂降的补偿效果, 假设系统在 0.16 s 发生故障, 网侧电压发生暂降, 暂降幅度接近 30% , 暂降波形如图 10(a) 所示。分别采用线性自抗扰控制和传统 PI 控制对网侧电流进行补偿, 通过观察图 10(b) 得到, 采用传统 PI 控制时, 电压大约需要 1 个周期才达到稳定, 并且在电压暂降幅度较大时, 并不能完全补偿电压, 补偿后的电压幅值低于暂降前的电压幅值; 而采用线性自抗扰控制时, 电压能迅速达到稳定, 仅需 $1/2$ 个周期, 并且在电压暂降幅度较大时, 能实现完全补偿, 补偿后电压与暂降前电压基本保持一致。

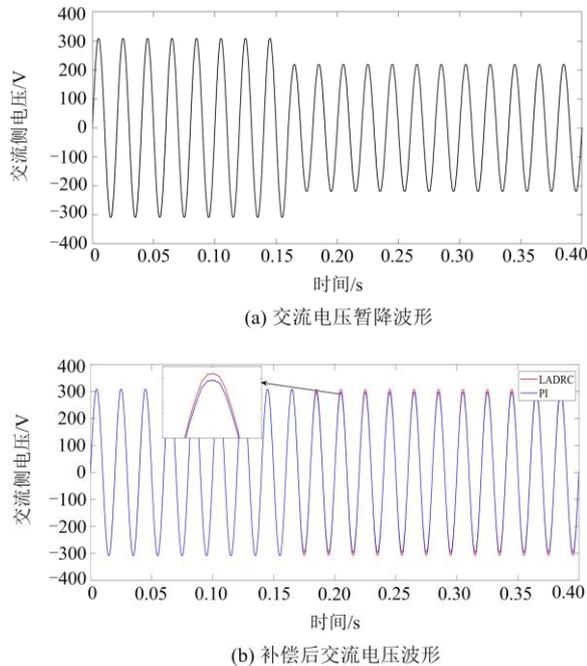


图 10 充电站电压暂降补偿图

Fig. 10 Voltage sag compensation diagram of charging station

4.2 DFACTS 协调控制的计算机仿真

在上述仿真基础上, 进行 DFACTS 协调控制。首先对并联 DFACTS 控制器 1、并联 DFACTS 控制器 2 和串联 DFACTS 控制器补偿顺序进行控制, 再根据模糊综合评判对关键参数进行优化。其优化过程如下:

结合计算机仿真经验与专家评判, 对电压稳定能力指标因数 u_1 、 u_2 赋予 0.6 和 0.4 的权值, 即权重集 $\omega = \{0.6, 0.4\}$ 。

然后依据计算机仿真结果与调试经验, 得到其评价矩阵 r 为

$$r = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.8 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

根据模糊变换进行综合评价, 得到矩阵 $A = [a_1, a_2, a_3] = [0.22, 0.18, 0.60]$, 即关键参数 K_{p0} 、 K_{p1} 、 K_{p2} 对电压稳定能力指标的影响比例分别为 0.22 、 0.18 和 0.60 。可以看出, 通过改变参数 K_{p0} 和 K_{p1} 对电压稳定能力影响不大, 而改变参数 K_{p2} 能显著提高电压稳定能力, 消除各 DFACTS 控制器电压负交互影响, 实现其协调控制。

图 11 为协调控制前后光伏快速充电站交流实际电压与参考电压之间的误差(取绝对值), 图 11(a) 和图 11(b) 分别为负载侧误差与网侧误差。可以看出协调控制后网侧电压和负载侧电压误差减小, 各 FACTS 控制器性能得到更好的发挥, 电压负交互影响得到消除, 协调控制效果较好。

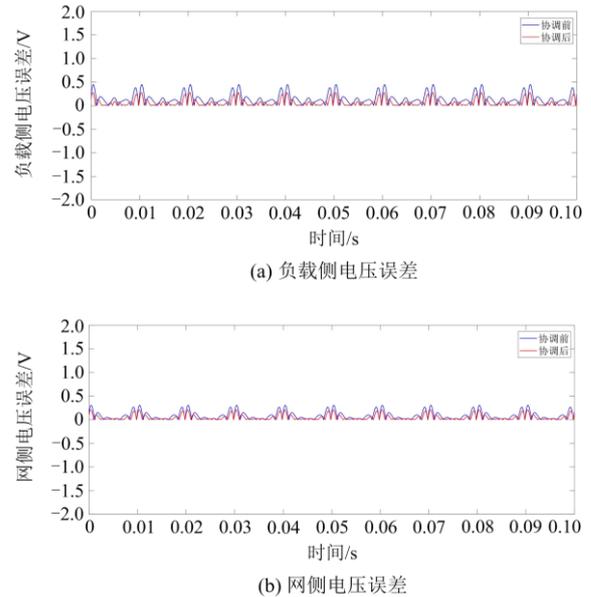


图 11 电压误差

Fig. 11 Voltage errors

5 结论

本文提出了多 DFACTS 电能质量综合补偿系统, 对光伏快速充电站电能质量综合治理策略进行研究。将线性自抗扰控制技术应用到 DFACTS 控制器中, 并进行协调控制设计, 提升系统的电压稳定能力。最后搭建计算机仿真模型, 进行仿真验证。

计算机仿真结果表明, 本文提出的多 DFACTS 电能质量综合补偿系统采用线性自抗扰控制方法相比传统 PI 控制方法, 在治理谐波、电压波动和电压

暂降等问题时拥有更好的补偿速度和精度,提高了系统的动态性和鲁棒性,并且通过协调控制,消除了各 DFACTS 控制器间的电压负交互影响,提高了系统的电压稳定能力。

参考文献

- [1] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 157-164.
PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 157-164.
- [2] 张怡, 郝思鹏. 不同场景下快速充电站的分层储能配置[J]. 供用电, 2020, 37(7): 94-100.
ZHANG Yi, HAO Sipeng. Hierarchical energy storage configuration of fast charging station in different scenarios[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(7): 94-100.
- [3] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [4] 全慧, 李相俊, 张杨, 等. 快充电站多类型应用方式的并网影响及控制技术综述[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 89-95, 103.
QUAN Hui, LI Xiangjun, ZHANG Yang, et al. A review of grid-connection impact and control technology of FCS multi-type application modes[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 89-95, 103.
- [5] 李国庆, 李欣彤, 边竞, 等. 计及光伏-负荷预测不确定性的直流跨省互联网双级调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4763-4776.
LI Guoqing, LI Xintong, BIAN Jing, et al. Two level scheduling strategy for inter-provincial DC power grid considering the uncertainty of PV-load prediction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4763-4776.
- [6] 沈煜, 白敬强, 黄文焘. 考虑交互影响机理的多电能质量治理装置优化配置[J]. 供用电, 2020, 37(11): 42-47.
SHEN Yu, BAI Jingqiang, HUANG Wentao. Optimal configuration of multiple power quality management devices considering interaction effects[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(11): 42-47.
- [7] MOHAMMADI M, MONTAZERI, ABASI S. Bacterial graphical user interface oriented by particle swarm optimization strategy for optimization of multiple type DFACTS for power quality enhancement in distribution system[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(3): 569-588.
- [8] 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.
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Research on reconfiguration strategy of active distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998(1): 3-5.
HAN Jingqing. Automatic disturbance rejection controller and its application[J]. Control and Decision, 1998(1): 3-5.
- [10] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C] // American Control Conference, June 4-6, 2003, Denver, USA: 4989-4996.
- [11] 李克强, 韩学山, 李华东, 等. 配网中光伏逆变器最优潮流追踪的分布式算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 711-720, 950.
LI Keqiang, HAN Xueshan, LI Huadong, et al. Distributed algorithm for optimal power flow pursuit by photovoltaic inverters in distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 711-720, 950.
- [12] 周雪松, 刘伟, 马幼捷, 等. 基于 LADRC 的三相四线制并联型有源电力滤波器系统分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1290-1299.
ZHOU Xuesong, LIU Wei, MA Youjie, et al. Analysis of three-phase four-wire shunt active power filter system based on LADRC[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1290-1299.
- [13] 杨林, 曾江, 马文杰, 等. 基于改进二阶线性自抗扰技术的微网逆变器电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 146-158.
YANG Lin, ZENG Jiang, MA Wenjie, et al. Voltage control of microgrid inverter based on improved second-order linear active disturbance rejection control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 146-158.
- [14] CHEN H, IYER A, HARLE Y R, et al. Dynamic grid power routing using controllable network transformers with decoupled closed-loop controller[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 2361-2372.
- [15] 李志华, 曾江, 黄骏翹, 等. 基于线性自抗扰控制的微网逆变器时-频电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 145-160.
LI Zhihua, ZENG Jiang, HUANG Junyi, et al. Time-frequency voltage control strategy of microgrid inverter based on linear active disturbance rejection control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):

- 145-160.
- [16] 杨林, 曾江, 黄仲龙. 线性自抗扰技术在 LCL 逆变器并网电流控制及有源阻尼中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1378-1386.
YANG Lin, ZENG Jiang, HUANG Zhonglong. Application of linear active disturbance rejection technique in grid-connected current control and active damping of LCL type inverter[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1378-1386.
- [17] 曾岳南, 郑雷, 周斌, 等. 线性自抗扰控制技术在 PWM 整流器中的应用[J]. 电力电子技术, 2016, 50(8): 13-15.
ZENG Yuenan, ZHENG Lei, ZHOU Bin, et al. Application of linear disturbance rejection control technology in PWM rectifier[J]. Power Electronics, 2016, 50(8): 13-15.
- [18] 王孝洪, 吴丰, HOANG T T G, 等. 线性自抗扰控制在全桥 DC-DC 变换器中的应用[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1610-1617.
WANG Xiaohong, WU Feng, HOANG T T G, et al. Application of linear active disturbance rejection control in full-bridge DC-DC converters[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(11): 1610-1617.
- [19] CHENG Y, ZHANG C. Configuration and operation combined optimization for EV battery swapping station considering PV consumption bundling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 276-293.
- [20] HENRIQUE A J, DE MATTOS A C. Probabilistic assessment of voltage quality on solar-powered electric vehicle charging station[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189.
- [21] 胡畔, 吴斌, 陈红坤, 等. 计及时序特性的电动汽车快充充电站谐波分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3645-3655.
HU Pan, WU Bin, CHEN Hongkun, et al. Harmonic analysis of electric vehicle fast-charging station considering sequence behavior of load[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3645-3655.
- [22] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 138-144.
- [23] 马幼捷, 赵健, 周雪松, 等. 并联混合型有源电力滤波器的线性自抗扰控制及稳定性分析[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 211-216.
MA Youjie, ZHAO Jian, ZHOU Xuesong, et al. A linear auto disturbance rejection controller for shunt hybrid active power filters and its stability analysis[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 211-216.
- [24] 王景钢, 刘轶. 考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 105-113.
WANG Jinggang, LIU Yi. Dynamic voltage support strategy of active distribution network considering current margin of photovoltaic inverter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 105-113.
- [25] 李勋, 杨荫福, 陈坚. 基于 SPWM 控制的 UPFC 开关函数数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 37-40.
LI Xun, YANG Yinfu, CHEN Jian. Switching function mathematical model of UPFC based on SPWM control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 37-40.
- [26] 宁平华, 张庆丰, 冯德仁, 等. 一种优化的光伏全局最大功率点追踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 152-160.
NING Pinghua, ZHANG Qingfeng, FENG Deren, et al. An optimized photovoltaic global maximum power point tracking method[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 152-160.
-
- 收稿日期: 2022-01-18; 修回日期: 2022-03-10
- 作者简介:
- 车 伟(1990—), 男, 本科, 研究方向为配电自动化系统与设备试验检测技术; E-mail: wei1028483892@163.com
- 陈 洁(1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网故障处理与试验检测技术; E-mail: chenjie@epri.sgcc.com.cn
- 胡亚杰(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配网电能质量分析与治理。E-mail: 1223306495@qq.com
- (编辑 周金梅)