

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.04.004

基于阻抗判据的变电站并联电容器组串抗率选择方法

甘景福¹, 潘建铭², 刘淇玉³, 李永刚², 李昕朔², 晏坤¹

(1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000; 2. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003;
3. 国网上海市电力公司市南供电公司, 上海 200233)

摘要: 为保证谐波不超标, 实际应用中一般先投入高串抗率电容器, 高、低串抗率电容器动作次数存在着差异性和不均衡性, 而高串抗率电容器的配置和使用带来更大的有功损耗, 经济性较差。针对这一问题, 本文提出一种基于阻抗判据的变电站并联电容器组串抗率选择方法。首先, 获取公共连接点谐波数据, 建立状态空间表达式, 采用卡尔曼滤波算法和标准差最小原则估计系统谐波阻抗; 然后, 依据电能质量标准得出限值谐波阻抗, 分析并联电容器组限值谐波阻抗、等值谐波阻抗与谐波放大倍数的关系, 确定串抗率选择的阻抗判据; 最后, 通过仿真算例验证本文方法的有效性和合理性。结果表明, 所提方法能降低并联电容器组配置时优先使用高串抗率电容器带来的有功损耗, 提高经济性。

关键词: 串抗率; 有功损耗; 卡尔曼滤波; 谐波阻抗; 阻抗判据

Selection Method of Series Reactance Rate of Shunt Capacitor Bank in Substation Based on Impedance Criterion

GAN Jingfu¹, PAN Jianming², LIU Qiyu³, LI Yonggang², LI Xinshuo², YAN Kun¹

(1. Tangshan Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Hebei Tangshan 063000, China; 2. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 3. Shinan Power Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: For assuring the harmonics not exceeding the standard, in practical applications the capacitor with high series reactance rate is switching firstly. The operation number of reactors with high and low reactance rate has both difference and heterogeneity and, however, the configuration and use of capacitor with high series reactance rate brings greater active loss and weak economic performance. For this problem, a kind of selection method of series resistance rate of shunt capacitor bank in substation based on impedance criterion is proposed in this paper. Firstly, the harmonic data of the common connection point are obtained, and the state space expression is set up. The Kalman filter algorithm and the minimum standard deviation principle are used to estimate the harmonic impedance of system; Then, the limit harmonic impedance is obtained in accordance with power quality standard, and the relationship among the limit harmonic impedance, the equivalent harmonic impedance and the harmonic amplification factor of the shunt capacitor bank is analyzed to determine the impedance criterion for the selection of the series resistance rate; Finally, the effectiveness and rationality of the method proposed in this paper are verified by simulation examples. The results show that the proposed method can reduce the active power loss caused by the priority use of high series reactance rate capacitors in the configuration of shunt capacitor banks and improve the economic performance.

Keywords: series reactance rate; active power loss; kalman filtering; harmonic impedance; impedance criterion

收稿日期:2023-02-13

基金项目:国网冀北电力有限公司科技项目(52010320019L)。

0 引言

近年来,随着电力系统中电力电子设备大规模使用,越来越多非线性负荷接入电网^[1],加之光伏和风电等分布式新能源广泛接入,电力系统谐波污染问题日益严重^[2-4]。并联电容器是无功补偿的重要设备,然而接入后会改变电网阻抗特性,对谐波呈放大作用,严重威胁系统的安全稳定运行^[5-6]。

目前主要采用将电容器配合特定串抗率电抗器的方法来解决谐波放大问题^[7]。文献[8]对谐波放大及串抗率选择方法做了陈述,提出串抗率的选择要保证电容器容抗小于电抗器感抗。文献[9]对并联多组电容器的情况进行分析,提出为保证对低次谐波的抑制,优先投入高串抗率电容器,虽然保证了对谐波的抑制,但未对抑制后系统侧谐波是否达标展开进一步讨论。根据现有研究^[10-13],在实际应用中先投入高串抗率的电容器,后投入低串抗率的电容器,当高串抗率电容器不投入时,低串抗率的电容器也不能投入,造成低串抗率电容器动作次数相比高串抗率的电容器少,甚至基本不投入。但如果不考虑实际谐波数据而简单的仅配置和使用高串抗率电容器,将带来较大的有功损耗,降低运行经济性。

根据文献[14],并联电容器对谐波的影响与系统谐波阻抗有关。目前系统谐波阻抗估计方法主要分为“干预式”和“非干预式”两种^[15-17]。干预式方法会破坏系统原有运行方式,因此一般不采用。非干预式方法不额外引入扰动,近年来受到广泛关注。文献[18]直接在复数域内求解误差模平方和最小值,得到真实最小二乘解,计算过程简单,但未考虑背景谐波波动和谐波阻抗变化。文献[19]考虑了系统谐波阻抗变化的情况,采用斜率比较法辨识系统谐波阻抗变化的时间点,从而对样本进行分段处理,结果精度更高,但该方法基于测量量没有误差,而实际系统中会有测量误差。文献[20]中提出一种阻抗聚类方法,按照不同系统谐波阻抗进行聚类,但无法区分阻抗时序。

由此,本文提出一种基于阻抗判据的变电站并联电容器组串抗率选择方法。首先,获取公共连接点(point of common coupling, PCC)谐波电压和电流数据,采用卡尔曼滤波算法和标准差最小原则进行系统谐波阻抗估计,为阻抗判据提供相应的数据支撑;然后,依据电能质量标准得出限值谐波阻抗,分析并联电容器组限值谐波阻抗、等值谐波阻抗与谐波放大倍数的关系,确定串抗率选择的阻抗判据;

最后,通过仿真算例分析验证所提方法的有效性和合理性。

1 并联电容器组对谐波的影响

以 n 次谐波为例,变电站多串抗率混装并联电容器组接入系统 PCC 处,见图 1。

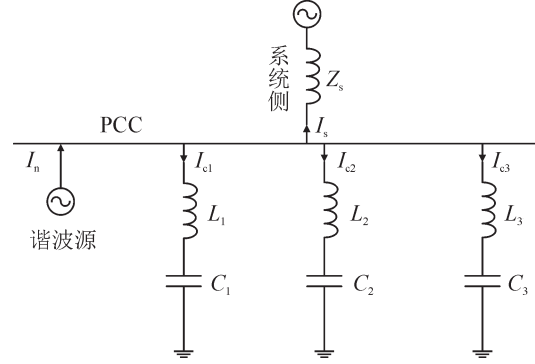


图1 并联电容器组接入系统图
Fig. 1 Diagram of access of shunt capacitor bank access to system

图 1 中,非线性负荷构成谐波源产生谐波,电容器串接电抗器并联接入 PCC 处,电网中除关注谐波源和电容器组外的其他部分等效为系统侧。

关注谐波源从 PCC 处注入的谐波电流分别流向系统侧和电容器支路^[21],电容器支路和系统侧谐波电流公式为

$$I_s = \frac{j(X_{Ln} - X_{Cn})}{Z_s + j(X_{Ln} - X_{Cn})} I_n \quad (1)$$

$$I_c = \frac{Z_s}{Z_s + j(X_{Ln} - X_{Cn})} I_n \quad (2)$$

式中: I_s 为系统侧谐波电流; I_c 为电容器支路谐波电流; I_n 为谐波源谐波电流; Z_s 为系统谐波阻抗; X_{Ln} 、 X_{Cn} 分别为并联电容器支路 n 次谐波感抗和容抗。

系统侧谐波电流放大倍数 K_s 和电容器支路谐波电流放大倍数 K_c 分别为

$$K_s = \frac{I_s}{I_n} = \frac{1}{K_{sc} + 1} \quad (3)$$

$$K_c = \frac{I_c}{I_n} = \frac{K_{sc}}{K_{sc} + 1} \quad (4)$$

式中, $K_{sc} = Z_s / j(X_{Ln} - X_{Cn})$ 。

当 $K_s < 1$, 即 $K_{sc} > 0$ 时,电容器支路感抗大于容抗,对系统侧谐波电流起抑制作用;当 $K_s > 1$, 即 $K_{sc} < 0$ 时,电容器支路感抗小于容抗,对系统侧谐波电流起放大作用。分析可知,并联电容器组对谐波的影响与系统谐波阻抗有关,利用系统谐波阻抗值能够计算出电容器组投入后的谐波电流,从而为串抗率选择阻抗判据的提出提供相应的数据支撑。

2 基于卡尔曼滤波算法与标准差最小原则的系统谐波阻抗估计

2.1 卡尔曼滤波算法与状态空间表达式

电力系统谐波分析等效电路见图2。

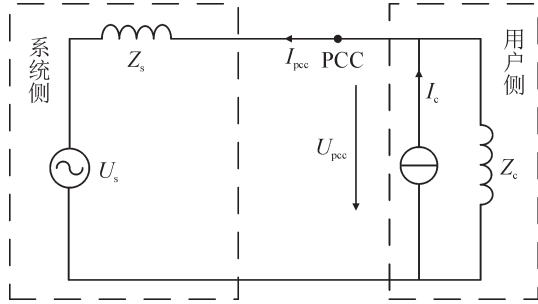


图2 谐波分析等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of harmonic analysis

图2中: U_s 为背景谐波电压; Z_s 为系统侧谐波阻抗; I_{pcc} 为 PCC 谐波电流; U_{pcc} 为 PCC 谐波电压; I_c 为用户侧谐波电流; Z_c 为用户侧谐波阻抗。

由图2电路关系可得系统谐波阻抗公式为

$$Z_s = \frac{U_{pcc} - U_s}{I_{pcc}} \quad (5)$$

在实际系统中,谐波电压 U_{pcc} 和谐波电流 I_{pcc} 由录波设备获得,难免存在随机扰动和噪声污染,并非真实值。为减小量测数据误差,本文以 U_{pcc} 、 I_{pcc} 为状态变量 X 构建状态空间表达式,采用卡尔曼滤波算法通过预测及测量反馈的方法得到其最优估计值^[22]。

在极短时间内可认为信号幅值 M 、角频率 ω 和相角 φ 随时间变化非常缓慢。设采样周期为 T_s , 则状态变量 X 两个相邻采样点间的数学关系式为

$$X_1(k) = M(k-1) \sin[\omega(k-1)(t(k-1) + T_s) + \varphi(k-1)] \quad (6)$$

$$X_2(k) = M(k-1) \cos[\omega(k-1)(t(k-1) + T_s) + \varphi(k-1)] \quad (7)$$

式中: X_1 为基分量; X_2 为正交分量。

卡尔曼滤波状态方程和量测方程分别为

$$X(k) = AX(k-1) + W(k) \quad (8)$$

$$Z(k) = HX(k) + V(k) \quad (9)$$

式中: $X(k)$ 为 k 时刻的状态向量; $Z(k)$ 为 k 时刻的量测向量; A 为状态转移矩阵; H 为量测矩阵; $W(k)$ 为系统内部的噪声; $V(k)$ 为实际测量值的测量噪声,这些噪声是与协方差矩阵 Q 和 R 有关的白噪声。

根据状态方程和相邻采样点数学关系式,可推导出状态转移矩阵 A 的表达式为

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\omega(k-1)T_s) & \sin(\omega(k-1)T_s) \\ -\sin(\omega(k-1)T_s) & \cos(\omega(k-1)T_s) \end{pmatrix} \quad (10)$$

本文研究针对系统中 n 次谐波,式(10)中 $\omega = 100\pi n$, 可视为不变量,将 A 改写为

$$A = \begin{pmatrix} \cos(100\pi n \cdot T_s) & \sin(100\pi n \cdot T_s) \\ -\sin(100\pi n \cdot T_s) & \cos(100\pi n \cdot T_s) \end{pmatrix} \quad (11)$$

由此,构建起系统状态空间公式为

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \cos(100\pi n \cdot T_s) & \sin(100\pi n \cdot T_s) \\ -\sin(100\pi n \cdot T_s) & \cos(100\pi n \cdot T_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}_{k-1} + W(k) \quad (12)$$

$$Z(k) = \begin{bmatrix} 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}_k + V(k) \quad (13)$$

由前一时刻状态变量量测值和状态空间表达式预测当前时刻状态变量值作为其先验值,预测方程为

$$\hat{X}^-(k) = A\hat{X}(k-1) \quad (14)$$

$$P^-(k) = AP(k-1)A^T + Q(k-1) \quad (15)$$

根据当前时刻量测量修正状态变量先验值得到状态变量最优估计值,修正方程为

$$K(k) = P^-(k)H^T[H P^-(k)H^T + R(k)]^{-1} \quad (16)$$

$$\hat{X}(k) = \hat{X}^-(k) + K(k)[Z(k) - H\hat{X}^-(k)] \quad (17)$$

$$P(k) = [I - K(k)H]P^-(k) \quad (18)$$

式中: $\hat{X}^-(k)$ 和 $P^-(k)$ 为仅使用 $k-1$ 时刻量测量得到的先验估计值; $K(k)$ 为修正部分的卡尔曼增益; $\hat{X}(k)$ 为状态变量 $X(k)$ 经修正后的最优估计值; $P(k)$ 为估计误差协方差矩阵。

2.2 标准差最小原则

电力系统运行方式改变、无功补偿方式变化均会导致系统谐波阻抗变化。但在较短时间内,可认为其变化很小。以标准差 σ 来表征系统谐波阻抗的变化程度^[23],则在包含 N 个数据点的较短数据段内。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [Z_s(n) - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N Z_s(m)]^2} \quad (19)$$

式中: $Z_s(n)$ 、 $Z_s(m)$ 分别为该数据段内第 n 、 m 个数据点处的系统谐波阻抗。

将经卡尔曼滤波处理后 PCC 谐波电压和电流的最优估计值 $\hat{U}_{pcc}$ 、 $\hat{I}_{pcc}$ 代入式(19)整理得

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{\hat{U}_{\text{pcc}}(m)}{\hat{I}_{\text{pcc}}(m)} - \frac{\hat{U}_{\text{pcc}}(n)}{\hat{I}_{\text{pcc}}(n)} - \left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{U_s(m)}{\hat{I}_{\text{pcc}}(m)} - \frac{U_s(n)}{\hat{I}_{\text{pcc}}(n)} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

系统谐波阻抗标准差 σ 是背景谐波电压 U_s 的函数。当 σ 最小,即在较短时间内系统谐波阻抗变化程度最小时,背景谐波电压最接近真实值。将式(20)改写成以下形式

$$\|J\|_F = \sigma \cdot \sqrt{N} = \|I - LX\|_F \quad (21)$$

式中: $\|\cdot\|_F$ 是矩阵的 Frobenius 范数, J 称为标准差矩阵, $I = [I(1), I(2), \dots, I(N)]^T$

$$I(n) = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \frac{\hat{U}_{\text{pcc}}(m)}{\hat{I}_{\text{pcc}}(m)} - \frac{\hat{U}_{\text{pcc}}(n)}{\hat{I}_{\text{pcc}}(n)}, n = 1, 2, \dots, N$$

$$L = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \frac{N-1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(1)} & \frac{1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(2)} & \dots & \frac{1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(N)} \\ \frac{1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(1)} & \frac{N-1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(2)} & \dots & \frac{1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(1)} & \frac{1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(2)} & \dots & \frac{N-1}{\hat{I}_{\text{pcc}}(N)} \end{bmatrix}$$

$$X = [X(1), X(2), \dots, X(N)]^T, X(n) = U_s(n)$$

采用复数域最小二乘法求解 J 阵 F-范数取最小值的解 X ,即背景谐波电压,再根据卡尔曼滤波得到的电压、电流最优估计值可对该短数据段内的系统谐波阻抗进行估计为

$$Z_s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\hat{U}_{\text{pcc}}(n) - U_s(n)}{\hat{I}_{\text{pcc}}(n)} \quad (22)$$

在整个采样时间内,将所有采样数据划分为长度为 N 的多个较短数据段,重复上述过程,实现整个采样时间内的系统谐波阻抗估计。

3 并联电容器组串抗率选择的阻抗判据

现有串抗率选择以抑制系统谐波为主要目的,在实际应用中先投入高串抗率的电容器,后投入低串抗率的电容器,高、低串抗率电容器动作次数存在着明显差异性和不均衡性。高串抗率电容器组所串接的电抗器会带来较大的有功功率损耗,在选择串抗率时应充分考虑经济性^[24-26]。

由图 1 可知,谐波源产生的谐波电流经 PCC 注入系统侧和电容器支路侧。从电能质量的角度考虑,系统侧谐波电流必须满足电网电能质量标准的约束。因此,串抗率选择应该以抑制或放大谐波

后,系统侧谐波电流不超标为基本原则,从而对现有串抗率选择方法做出一定改进。国标 GB/T 14549—1993《电能质量—公用电网谐波》明确规定了电网谐波电流限值,见表 1。

表 1 电网谐波电流限值
Table 1 Harmonic current limit of power grid

标称电压 /kV	基准短路 容量/MVA	谐波次数与谐波电流限值/A					
		2	3	4	5	6	7
6	100	43	34	21	34	14	24
10	100	26	20	13	20	8.5	15
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8

规定表 1 中 n 次谐波对应的谐波电流限值为 I_{mn} 。当系统侧谐波电流恰好等于限值时,根据系统侧谐波电流表达式,得到下面公式

$$I_{\text{mn}} = \frac{j(X_{\text{Ln}} - X_{\text{Cn}})}{Z_s + j(X_{\text{Ln}} - X_{\text{Cn}})} I_n \quad (23)$$

$$Z_n = \frac{Z_s I_{\text{mn}}}{I_n - I_{\text{mn}}} \quad (24)$$

式中: Z_n 为系统侧 n 次谐波电流等于限值时对应的并联电容器组等值谐波阻抗,称为 n 次限值谐波阻抗; Z_s 为系统谐波阻抗; I_n 为由谐波源注入 PCC 的 n 次谐波电流。

设可供选择的串抗率有高、低两种,选择 m_1 组低串抗率电容器和 m_2 组高串抗率电容器投入运行。高、低串抗率电容器的基频感抗分别为 X_{lg} 、 X_{ld} ,容抗均为 X_{C} ,则:

$$Z = \frac{\frac{1}{m_2} j \left(nX_{\text{lg}} - \frac{X_{\text{C}}}{n} \right) \cdot \frac{1}{m_1} j \left(nX_{\text{ld}} - \frac{X_{\text{C}}}{n} \right)}{\frac{1}{m_2} j \left(nX_{\text{lg}} - \frac{X_{\text{C}}}{n} \right) + \frac{1}{m_1} j \left(nX_{\text{ld}} - \frac{X_{\text{C}}}{n} \right)} \quad (25)$$

式中: n 为谐波次数; Z 称为并联电容器组的 n 次等值谐波阻抗。

由式(24)和(25),根据系统谐波阻抗 Z_s 、谐波电流 I_n 及电网电压、短路容量等参数即可确定限值谐波阻抗 Z_n ,其实际为配置电容器组后 n 次谐波恰好不超标的并联电容器组等值谐波阻抗。由此,对并联电容器组限值谐波阻抗、等值谐波阻抗与谐波放大倍数的关系进行分析,寻找满足电能质量标准的并联电容器组等值谐波阻抗取值范围。

取等值谐波阻抗 Z 的虚部为横坐标,系统侧谐波电流和电容器支路谐波电流放大倍数 $K_s(K_c)$ 为纵坐标,绘制阻抗-电流关系曲线见图 3。

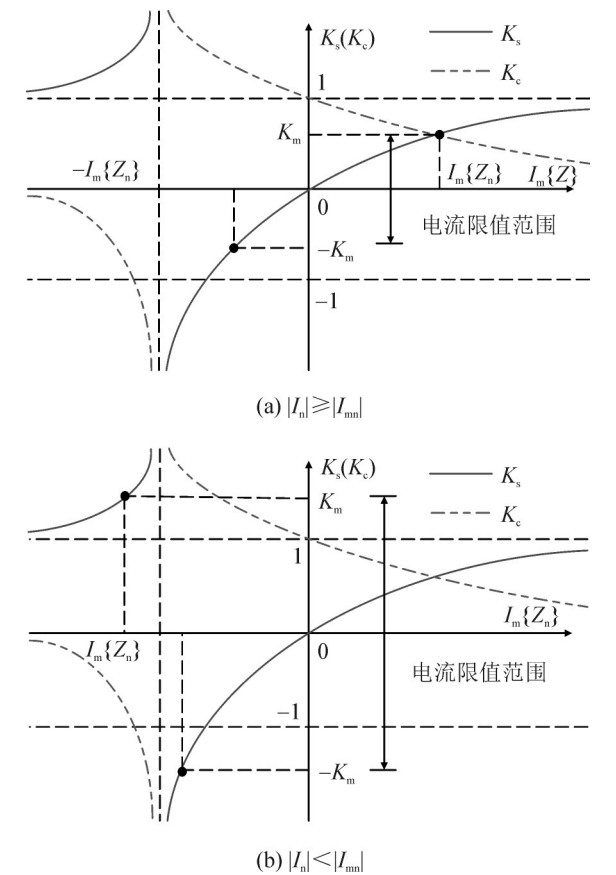


图3 阻抗-电流关系曲线

Fig. 3 Curve of impedance-current relationship

图3中, K_m 为系统侧电流等于限值时的系统侧谐波电流放大倍数。分析可知:当 $|I_n| \geq |I_{mn}|$ 时, $K_m < 1$,系统侧谐波电流必须被抑制在电流限值范围内,同时为保证电容器的安全运行要避免电容器支路谐波电流的放大;当 $|I_n| < |I_{mn}|$ 时, $K_m > 1$,因此系统侧谐波电流可以被抑制也可以在限值范围内被放大,同时也要避免电容器支路谐波电流的放大。因此,可以确定并联电容器组串抗率选择的阻抗判据:

$$Z: \begin{cases} 0 < I_m\{Z\} \leq I_m\{Z_n\}, & |I_n| \geq |I_{mn}| \\ I_m\{Z\} \leq I_m\{Z_n\} \text{ 或 } I_m\{Z\} \geq 0, & |I_n| < |I_{mn}| \end{cases} \quad (26)$$

式中: $I_m\{Z\}$ 为并联电容器组 n 次等值谐波阻抗的虚部; $I_m\{Z_n\}$ 为 n 次限值谐波阻抗的虚部。

当投入并联电容器组进行无功补偿时,根据在各次谐波下均满足阻抗判据的原则进行并联电容器组串抗率的选择,在满足阻抗判据的基础上先保证低串抗率电容器尽可能投入运行,以均衡高、低串抗率电容器动作次数的显著差异,降低并联电容器组运行产生的有功损耗,提高系统运行的经济性。

4 算例分析

4.1 系统谐波阻抗估计

搭建典型三馈线模型,验证本文系统谐波阻抗

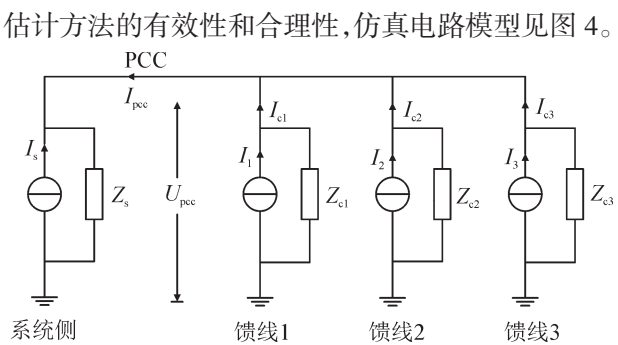


图4 典型三馈线模型

Fig. 4 Typical three feeder model

图中, Z_s 和 I_s 分别为系统谐波阻抗和谐波电流; Z_{ci} 和 I_{ci} ($i=1,2,3$)分别为馈线 i 支路的等效谐波阻抗和量测谐波电流。

以3次谐波为例,模型具体参数见表2。

表2 典型三馈线模型参数		
Table 2 Typical three feeder model parameters		
线路	谐波阻抗/ Ω	谐波电流源/A
系统侧	$5.028 \angle 74.332^\circ$	$15 \angle 10^\circ$
馈线1	$69.462 \angle 69.744^\circ$	$60 \angle 60^\circ$
馈线2	$104.862 \angle 65.098^\circ$	$35 \angle 30^\circ$
馈线3	$89.023 \angle 71.843^\circ$	$40 \angle 40^\circ$

在系统侧和用户侧各谐波源电流的幅值和相角中叠加 $\pm 10\%$ 的随机扰动,仿真中0.2 s前用户侧谐波源未产生谐波,自0.2 s开始采集PCC谐波电压、电流数据,得到80组数据采样点,谐波数据见图5所示。

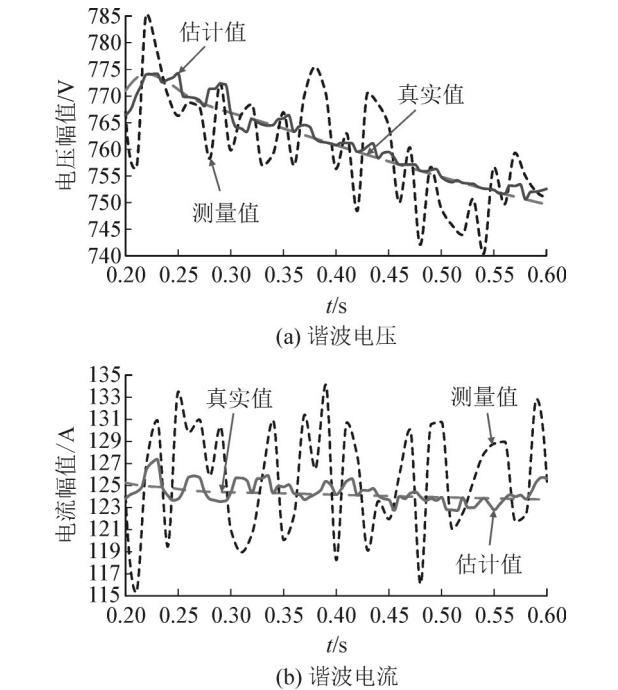


图5 公共连接点谐波数据

Fig. 5 Harmonic data of common coupling point

由图 5 可知,与测量值相比,经卡尔曼滤波算法得到的 PCC 谐波电压和谐波电流的估计值更加接近真实值,数据误差小。

按长度 $N=10$ 划分数据段进行系统谐波阻抗估计。理论上,该计算过程不受系统谐波阻抗变化的影响,为了说明这一点,在 0.4 s 时改变模型阻抗参数,系统谐波阻抗估计结果见图 6 所示。

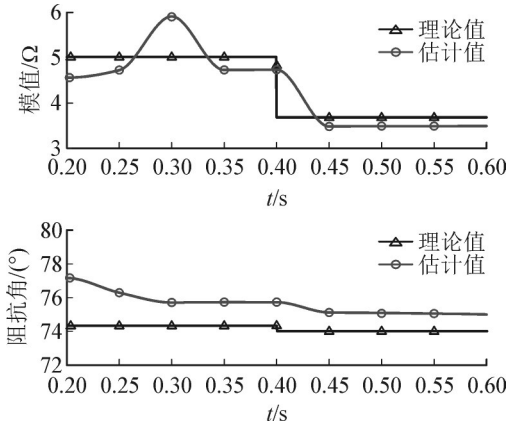


图 6 公共连接点谐波数据
Fig. 6 Harmonic data of common coupling point

另采用 3 种方法估计系统谐波阻抗:方法 1 为复最小二乘法;方法 2 为主导波动量法;方法 3 为复 ICA 法。采用式(27)计算 4 种方法的相对估计误差,以评价估计精度。

$$E_{\text{rel}} = \left| \frac{\hat{Z}_s - Z_s}{Z_s} \right| \times 100\% \quad (27)$$

在本文方法中,取所有数据段阻抗估计值的平均值作为系统谐波阻抗估计结果,各方法系统谐波阻抗估计结果见表 3。

表 3 系统谐波阻抗估计结果 Table 3 Estimation result of system harmonic impedance		
方法	3 次系统谐波阻抗	
	估计值/ Ω	$E_{\text{rel}}/\%$
方法 1	$4.655\angle 70.556^\circ$	9.76
方法 2	$4.768\angle 69.040^\circ$	10.37
方法 3	$4.862\angle 71.358^\circ$	6.08
本文方法	$4.872\angle 76.082^\circ$	4.32
理论值	$5.028\angle 74.332^\circ$	—

表 4 谐波电流采集与谐波阻抗估计结果 Table 4 Harmonic current acquisition and harmonic impedance estimation results						
参数	谐波次数					
	2	3	4	5	6	7
谐波电流/A	4.68	35.25	1.57	24.82	1.62	7.55
系统谐波阻抗/ Ω	$1.372+j2.298$	$1.358+j3.449$	$1.335+j4.572$	$1.402+j5.825$	$1.336+j7.008$	$1.356+j8.056$
限值谐波阻抗/ Ω	$-1.673-j2.802$	$1.781+j4.523$	$-1.518-j5.200$	$5.817+j24.170$	$-1.658-j8.685$	$-2.731-j16.220$

由表 3 可知,本文方法通过卡尔曼滤波降低了量测数据中随机扰动分量的影响,计算过程不受系统谐波阻抗变化的影响,相对于其他 3 种方法具有更高的估计精度。

4.2 并联电容器组串抗率选择

搭建 10 kV 配电网模型,其等效电路见图 7。PCC 处连接 4 条馈线,每条馈线上均连接 2 个负载为 $80+j120$ 的用户,其中用户 1、3 为电弧炉负荷,构成谐波源。系统短路容量为 100 MVA, Z_1 为整个电网中除 4 条馈线外其他区域电网的等效谐波阻抗, U_1 为区域电网等效谐波电压源,除谐波源用户 1 和 3 外的其他部分称为系统侧。在 PCC 处配备有额定电压为 10.5 kV,额定容量为 0.9 Mvar,串抗率为 4.5%和 12%的电容器各 5 组,电容器容抗 X_c 均为 106.103Ω 。

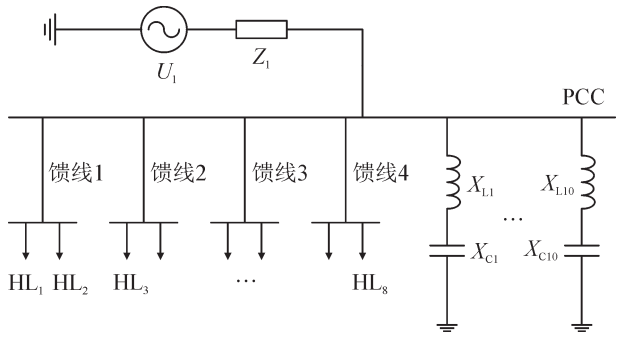


图 7 配电网仿真模型
Fig. 7 Simulation model of distribution network

采集 PCC 处各次谐波电流,估计各次系统谐波阻抗并计算各次限值谐波阻抗,结果见表 4。

测量 PCC 节点电压为 9.21 kV,节点电压过低,说明系统中无功功率不足。当补偿 5 组电容器后,节点电压可抬升至 10.46 kV,则共有 6 种可供选择的串抗率方案:方案 1(5 组 12%串抗率电容器);方案 2(1 组 4.5%串抗率电容器,4 组 12%串抗率电容器);方案 3(2 组 4.5%串抗率电容器,3 组 12%串抗率电容器);方案 4(3 组 4.5%串抗率电容器,2 组 12%串抗率电容器);方案 5(4 组 4.5%串抗率电容器,1 组 12%串抗率电容器);方案 6(5 组 4.5%串抗率电容器)。

根据表4,利用阻抗判据分析每种方案的可行性,见图8。方案可行的依据为:在3次和5次谐波波下(算例中3、5次谐波电流已超出限值,即 $|I_n| \geq |I_{sn,max}|$),

$0 < \text{Im}\{Z\} < \text{Im}\{Z_n\}$;在其他各次谐波波下(算例中2、4、6、7次谐波未超出限值,即 $|I_n| < |I_{sn,max}|$), $\text{Im}\{Z\} > 0$ 或 $\text{Im}\{Z\} \leq \text{Im}\{Z_n\}$ 。

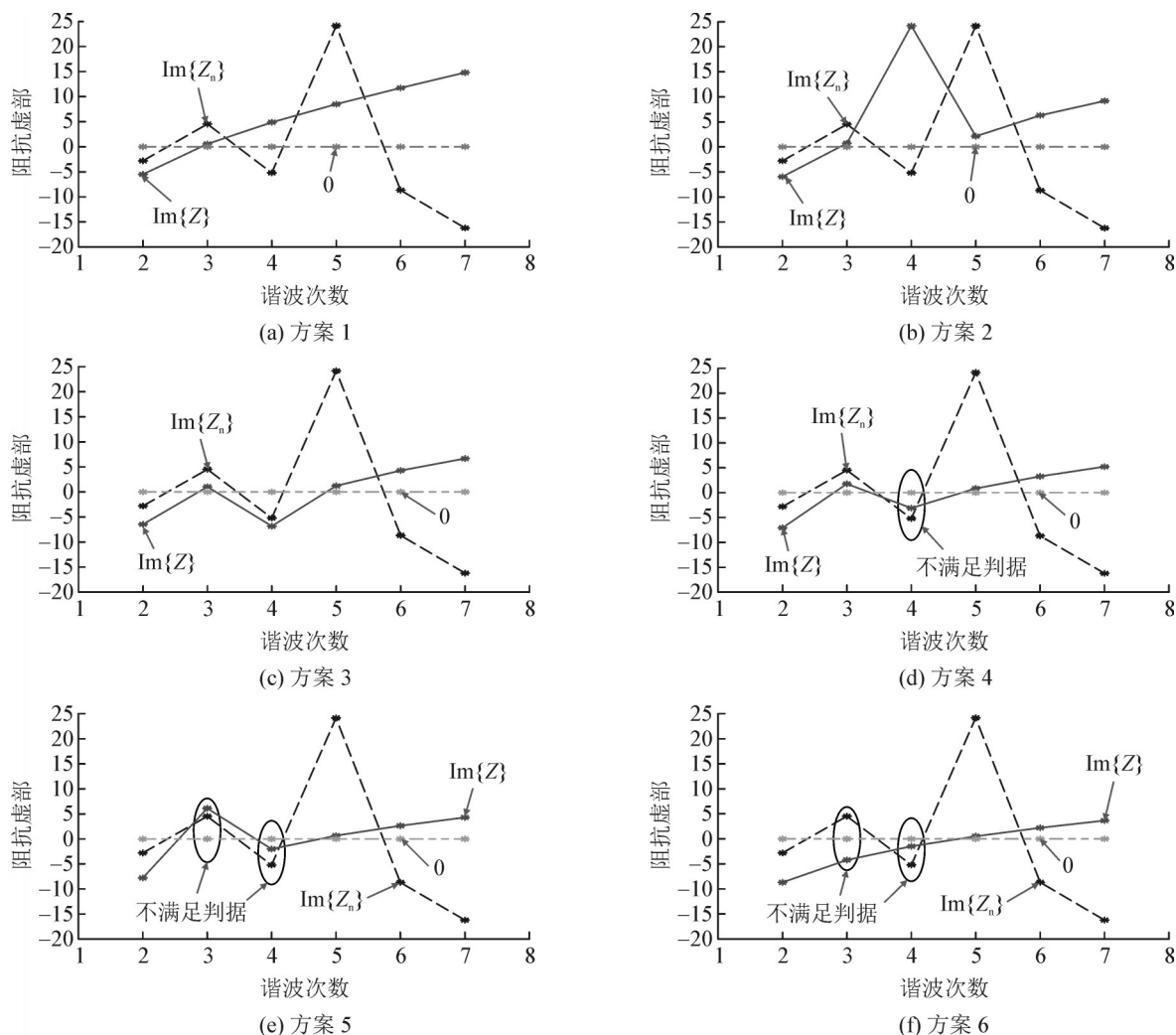


图8 串抗率方案可行性
Fig. 8 Feasibility of series reactance rate scheme

由图8,方案4、5和6均不满足阻抗判据,予以排除。方案1、2和3均满足阻抗判据,投入运行后系统谐波均能满足电能质量标准。其中方案1作为按照现有方法和运行规范确定的串抗率方案,高串抗率电容器全部投入运行,在经济上是不适当的。与方案2相比,方案3将低串抗率电容器尽可能投入,高、低串抗率电容器投入组数更加均衡,能更有效降低仅配置和使用高串抗率电容器而造成的较大损耗。因此,按照方案3选择电容器组串抗率投入系统进行无功补偿。

根据JB/T 5346《高压并联电容器用串联电抗器》的相关说明,配置12%串抗率三相空心电抗器的并联电容器其单相损耗功率约为7 kW,以每年运行5 000 h估算,三相串联电抗器损耗电能约为10.5万kW·h,而配置4.5%串抗率三相空心电抗器

的并联电容器其每年损耗电能约降低一半。因此,按照方案1仅配置和使用高串抗率并联电容器组,其三相有功损耗功率约为105 kW,而方案3的三相有功损耗功率约为84 kW。可以看出,采用本文方法选择并联电容器组串抗率方案使得电抗器上的有功损耗降低约20%,能够有效提高运行经济性。

5 结语

本文对高、低串抗率电容器动作次数不均衡,高串抗率电容器带来较大有功损耗的问题进行研究,提出一种基于阻抗判据的并联电容器组串抗率选择方法,得到如下结论:

1)通过卡尔曼滤波降低了量测数据中随机扰动分量及噪声等因素的影响,提高了系统谐波阻抗估计精度,其计算过程不受阻抗变化影响,能为并

联电容器组串抗率选择提供数据支撑;

2)系统需要无功补偿时,基于阻抗判据选择合理的电容器组串抗率方案投入运行,能够有效改善优先配置和使用高串抗率电容器带来的较大有功功率损耗,提高系统运行经济性。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [2] 肖湘宁,廖坤玉,唐松浩,等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报,2018,33(4): 707-720.
XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] 李建文,吴滨源,李永刚,等. 分析谐波劣化机理的逆变器灰箱宽频域矩阵模型及求解方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(18): 155-163.
LI Jianwen, WU Binyuan, LI Yonggang, et al. Gray-box wide frequency domain matrix model of inverter for harmonic degradation mechanism analysis and its solution method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 155-163.
- [5] 荀华,张翔宇,李国浩,等. 内蒙古电网并联电容器装置缺陷统计分析[J]. 内蒙古电力技术,2017,35(2): 10-14.
XUN Hua, ZHANG Xiangyu, LI Guohao, et al. Statistical analysis on defects of shunt capacitor devices in Inner Mongolia power grid[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2017, 35(2): 10-14.
- [6] BALUK, MUKHERJEE V. Siting and sizing of distributed generation and shunt capacitor banks in radial distribution system using constriction factor particle swarm optimization[J]. Electric Power Components and Systems, 2020, 48(6): 697-710.
- [7] 朱建华,徐刚刚,刘鹏飞,等. 并联电容器装置接地和电抗率选取建议[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(5): 7-11.
ZHU Jianhua, XU Ganggang, LIU Pengfei, et al. Selection advice on grounding and reactance ratio of shunt capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5): 7-11.
- [8] 陈伯胜. 串联电抗器抑制谐波的作用及电抗率的选择[J]. 电网技术,2003,27(12): 92-95.
CHEN Baisheng. Harmonics restraining function of serial reactor and selection of reactance rate[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 92-95.
- [9] 翟运娟,韩本帅,于丽娜. 并联电容器装置串联电抗器参数分析与选择[J]. 国网技术学院学报,2016,19(3): 17-20.
ZHAI Yunjuan, HAN Benshuai, YU Lina. Parameter analysis and selection of series reactor in parallel capacitor device[J]. Journal of State Grid Technology College, 2016, 19(3): 17-20.
- [10] TUSHAR M H K, ASSI C. Volt-VAR control through joint optimization of capacitor bank switching, renewable energy, and home appliances[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4077-4086.
- [11] 郝福忠,赵锋,李晋城,等. 考虑电网谐波影响的电容器投切研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(4): 79-83.
HAO Fuzhong, ZHAO Feng, LI Jincheng, et al. Research of capacitor switching considering harmonic influence[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 79-83.
- [12] 张程,王主丁,张宗益,等. 多负荷水平下配电网电容器优化配置算法[J]. 电网技术,2010,34(12): 85-89.
ZHANG Cheng, WANG Zhuding, ZHANG Zongyi, et al. An algorithm for optimal configuration of capacitors in distribution network under multi-load levels[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 85-89.
- [13] 俞永军,张帆,骆福权,等. 一种电容器组串联电抗器谐波过载保护的实现方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 54-57.
YU Yongjun, ZHANG Fan, LUO Fuquan, et al. Achievement method on harmonic overload protection for series reactor of capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 54-57.
- [14] 邬光耀,徐永海,洪旺松. 并联电容器串抗率的选择方法研究[J]. 机电信息,2014(6): 21-23.
WU Guangyao, XU Yonghai, HONG Wangsong. Research on the selection method of series reactance ratio of parallel capacitors[J]. Mechanical and Electrical Information, 2014(6): 21-23.
- [15] 钱叶牛,李鹏飞,姚黎婷,等. 基于混合整体最小二乘法的系统谐波阻抗估计[J]. 电力电容器与无功, 2017, 38(4): 115-120.
QIAN Yeniu, LI Pengfei, YAO Liting, et al. System harmonic impedance estimation based on hybrid global least square method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(4): 115-120.

- [16]丁同,陈红坤,吴斌,等.多谐波源定位及谐波责任量化区分方法综述[J].电力自动化设备,2020,40(1):19-30.
DING Tong, CHEN Hongkun, WU Bin, et al. Overview on location and harmonic responsibility quantitative determination methods of multiple harmonic sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 19-30.
- [17]夏焰坤,唐文张,林欣懿.基于优化高斯过程回归的谐波阻抗估计方法[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(12):129-136.
XIA Yankun, TANG Wenzhang, LIN Xinyi. Harmonic impedance estimation method based on optimized Gaussian process regression[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(12): 129-136.
- [18]贾秀芳,华回春,曹东升,等.基于复线性最小二乘法的谐波责任定量划分[J].中国电机工程学报,2013,33(4):149-155.
JIA Xiufang, HUA Huichun, CAO Dongsheng, et al. Determining harmonic contributions based on complex least squares method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 149-155.
- [19]马智远,许中,黄裕春,等.背景谐波阻抗变化情况下的谐波责任划分[J].电测与仪表,2016,53(23):78-83.
MA Zhiyuan, XU Zhong, HUANG Yuchun, et al. Harmonic contributions determination on condition of changing background harmonic impedance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(23): 78-83.
- [20]刘子腾,徐永海,丁一博,等.考虑背景谐波电压波动和阻抗变化的多谐波责任划分[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(3):84-91.
LIU Ziteng, XU Yonghai, DING Yibo, et al. Multi-harmonic responsibility division considering background harmonic voltage fluctuation and impedance variation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 84-91.
- [21]杨汾艳,徐柏榆,梅桂华,等.交直流混合电网中变电站电容器组串联电抗率选择[J].电力自动化设备,2009,29(6):29-34.
YANG Fenyan, XU Baiyu, MEI Guihua, et al. Selection of series reactance ratio of substation capacitor banks in AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 29-34.
- [22]HOFFMANN N, FUCHS F W. Minimal invasive equivalent grid impedance estimation in inductive - resistive power networks using extended Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 631-641.
- [23]舒勤,彭安庆,徐方维,等.多直流馈入受端城市电网直流落点处系统侧谐波阻抗估计方法[J].高电压技术,2020,46(6):2049-2056.
SHU Qin, PENG Anqing, XU Fangwei, et al. Method for utility harmonic impedance estimation at DC terminals of multi-infeed urban power network[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2049-2056.
- [24]王继隆,李盛伟,王楠,等.变电站并联电容器组配置及分闸过电压的仿真分析[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(1):58-64.
WANG Jilong, LI Shengwei, WANG Nan, et al. Configuration of shunt capacitor bank in substation and simulation of opening overvoltage[J]. Proceedings of the CSU - EPSC, 2019, 31(1): 58-64.
- [25]陈磊,吴诚威,李澳,等.基于电流监测和动态电阻分析的电容器组SF₆断路器电寿命评估系统[J].高压电器,2023,60(1):55-62.
CHEN Lei, WU Chengwei, LI Ao, et al. Electrical endurance assessment system of SF₆ circuit breaker for switching capacitor bank based on current monitoring and dynamic resistance analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 60(1): 55-62.
- [26]王耀强,朱天佑,张明,等.中高频电抗器损耗仿真计算及测试研究[J].变压器,2022,59(5):52-56.
WANG Yaoqiang, ZHU Tianyou, ZHANG Ming, et al. Loss simulation and measurement research for medium and high frequency reactor[J]. Transformer, 2022, 59(5): 52-56.

作者简介:

甘景福(1973—),男,高级工程师,研究方向为电力系统调度与运行维护检修管理与技术。

潘建铭(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析。E-mail:1261205912@qq.com。

刘淇玉(1997—),女,工程师,主要从事研究方向为新能源电力系统工作。

李永刚(1967—),男,教授,研究方向为新能源电力系统、大型电机故障诊断。

李昕朔(1998—),男,硕士研究生,研究方向为电能质量分析。

晏坤(1988—),男,工程师,主要从事电网调度与负荷预测及电力设备故障识别工作。