

# A Load Switching Intelligent Sensing System Based on Medium Voltage Carrier Communication Device

Lishan Ma<sup>1</sup>, Tao Yu<sup>1</sup>, Xuerong Li<sup>1</sup>, Shunhu Dong<sup>1</sup>, Guorui Zhang<sup>2</sup>, Jianying Xu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Grid Qinghai Electric Power Company, Guoluo, Xining Qinghai

<sup>2</sup>State Grid Qinhuangdao Electric Power Supply Company, Qinhuangdao Hebei

<sup>3</sup>Qingdao Topscmm Communication Co. Ltd., Qingdao Shandong

Email: 13997231313@139.com

Received: Jul. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 30<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 6<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

As the core line of distribution network load transmission, 10 kV medium voltage power line can reduce line loss to a great extent. However, the current situation of the power grid is that the basic information of 10 kV line is disordered and the relationship between line changes is fuzzy, which leads to unbalanced load and high line loss rate. At present, the solution is the traditional way such as manual line inspection and power drawing discrimination, which has poor timeliness, low accuracy and the risk of potential personnel injury. In this paper, we discuss a middle carrier communication device based on the load change intelligence told system, using the only physical line 10 kv medium voltage line sequence signal transmission characteristics, real-time accurate criterion line change relations, and the load change intellisense, make 10 kv medium voltage power line is in the optimal load distribution, reduce the line loss, greatly reduce the wastage of the electricity energy.

## Keywords

Medium Voltage Line Carrier, The Change Relationship, Cut Load Change, Intellisense, Line Loss per Unit, Electricity Energy

---

# 基于中压载波通讯装置的负荷切改智能感知系统

马丽山<sup>1</sup>, 于涛<sup>1</sup>, 李学荣<sup>1</sup>, 董顺虎<sup>1</sup>, 张国瑞<sup>2</sup>, 徐剑英<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国网青海省电力公司果洛供电公司, 青海 西宁

文章引用: 马丽山, 于涛, 李学荣, 董顺虎, 张国瑞, 徐剑英. 基于中压载波通讯装置的负荷切改智能感知系统[J]. 智能电网, 2020, 10(4): 173-179. DOI: 10.12677/sg.2020.104019

<sup>2</sup>国网冀北秦皇岛电力公司, 河北 秦皇岛

<sup>3</sup>青岛鼎信通讯股份有限公司, 山东 青岛

Email: 13997231313@139.com

收稿日期: 2020年7月17日; 录用日期: 2020年7月30日; 发布日期: 2020年8月6日

## 摘要

10 kV中压电力线作为配网负荷输送的核心线路, 负载平衡分配可很大程度的降低线损。然而电网现状是10 kV线路基础信息紊乱、线变关系模糊, 致使负荷不平衡导致线损率高。目前解决方法是人工巡线、拉电判别等传统方式, 时效性差、准确率低, 同时潜在人员伤害的风险。文中讨论一种基于中压载波通讯装置的负荷切改智能感知系统, 利用10 kV中压线路的唯一物理线路传输特征序列信号, 实时的准确的判别线变关系, 并对负荷切改智能感知, 使10 kV中压电力线处于最优的负荷分配, 降低线损, 可有效降低电能能量的损耗。

## 关键词

中压电力线载波, 线变关系, 负荷切改, 智能感知, 线损率, 电能能量

Copyright © 2020 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

10 kV 中压电力线作为配网负荷输送的核心线路, 理想状态是线路上负荷分配均匀, 电能损耗降到最低, 最大程度提高能量输送效率, 而实际上多数线路上负荷分配不合理, 线路上的负荷以 10 kV/380V 变压器为单位, 合理分配供电线路下的变压器才能最大程度的降低线损率。随着供配电技术的不断发展, 新的 10 kV 工频变压器不断接入, 大大增加了中压配电网的复杂性[1] [2]。另外, 中压配电线路地形复杂、线路方式多样, 且在中压配电网建设与维护的过程中经常进行线路改造、负荷切换等, 使得原本清楚的中压线变关系不断发生变化, 难以理清, 大大增加了电力营配业务开展的难度[3]。

自 2016 年以来, 电力系统很多机构开始尝试采用大数据方法进行归属识别, 通过电能表电流、功率数据, 工频过零偏移和工频过零畸变等手段进行台区归属识别, 但是大数据方法受设备采样精度、数据同步性等因素影响大, 判别成本较高, 尚未取得较好结果[4]。因此, 准确识别中压线变关系对 10 kV 配电网的运行控制和故障诊断具有十分重要的意义。而目前传统方案为人工现场巡线逐一理清线变关系, 但是该方法耗时耗力, 对于电缆线路和混合线路, 只有依靠停电区分, 操作难度大, 且会造成巨大经济损失, 也存在判别不准的情况, 自 2016 年以来, 电力系统很多机构开始尝试采用大数据方法进行归属识别, 通过工频过零偏移和工频过零畸变等手段进行线变归属识别, 但是大数据方法受设备采样精度、数据同步性等因素影响大, 判别成本较高, 尚未取得较好结果。中压电力线载波[5]是一种电力公司专有的有线通信[6], 文中从技术实现的角度, 研究了实现使用中压载波通信的进行负荷单元切改智能感知的方法。

青海省地域宽广, 配电网沿各种地形延伸, 跨越山麓、河谷、农田、草场和树林, 对电能能量输送

效率要求极高，同时对停送电的准确度要求为百分之百。对于这些区域、这种场景，使用中压电力线载波作为通信手段，准确的判别变压器线路归属，定位每个负荷单元的实时物理运行状态。

## 2. 负荷切改智能感知系统

线损率是营配电部门考核的重要指标，而负荷单元线变关系准确是降低线损率[7]的有效手段。负荷切改智能感知系统(见图1)中的终端设备实时监测负荷单元状态，当负荷单元线变关系发生变化时，终端通过在低压侧注入低频特征序列载波信号[8]，载波信号穿过变压器通过 10 kV 中压线路传输到变电站出线端，在出线端的分析机对特征序列信号进行提取识别并上报主站，主站进行算法判别出线变关系并手机短信通知营运部门。

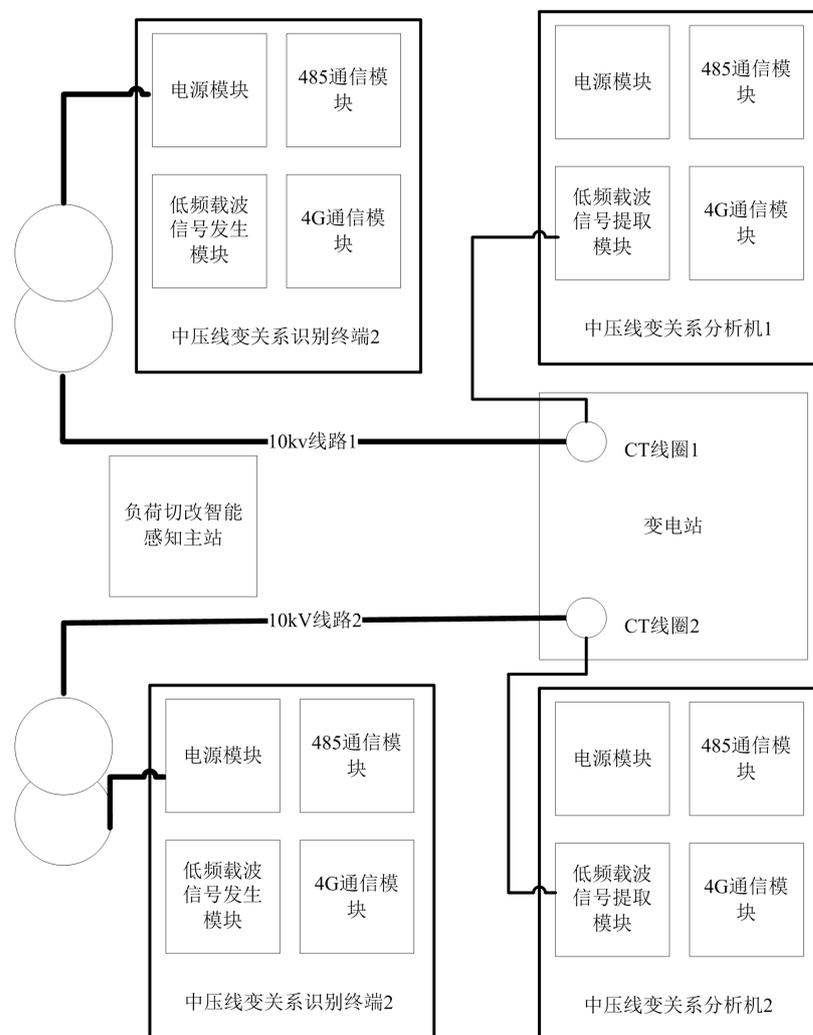


Figure 1. Diagram of intelligent sensing system for load switching

图 1. 负荷切改智能感知系统框图

### 2.1. 载波信号经变压器的传输特性

目前，世界各国地电力系统中电能的生产、传输和供电方式绝大多数采用三相制[9]，变压器的工业化生产已经标准化或规范化，现场运行的 10 kV/380 kV 变压器原边副边连接类型是 Dyn11 (Ydn11) [10]，

当变压器原边副边连接类型为 Dyn11 时，原边为三角形联结(D1)，副边为星形联结(Yn)；当变压器原边副边连接类型为 Ynd11 时，原边为星形联结(Yn)，副边联结类型为三角形(D11)。

以星三角 Dyn11 为例(见图 2)，通过联结组转换为转角矢量图(见图 3)。

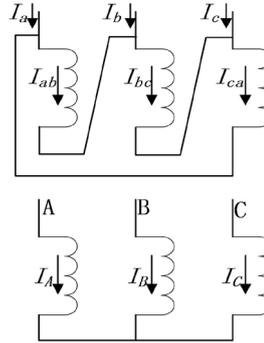


Figure 2. Connection group of Dyn11 connection mode transformer

图 2. Dyn11 连接方式变压器的联结组

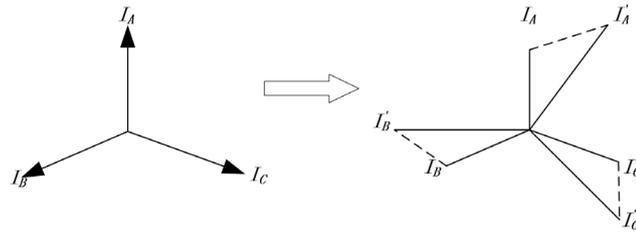


Figure 3. Dyn11 connection mode transformer star triangle Angle vector diagram

图 3. Dyn11 连接方式变压器星三角转角矢量图

根据基尔霍夫电流定律(KCL)，可得知，

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = \frac{1}{n} \dot{i}_a - \frac{1}{n} \dot{i}_c = \sqrt{3} \frac{1}{n} \dot{i}_a \angle -30^\circ \tag{1}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = \frac{1}{n} \dot{i}_b - \frac{1}{n} \dot{i}_a = \sqrt{3} \frac{1}{n} \dot{i}_b \angle -30^\circ \tag{2}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = \frac{1}{n} \dot{i}_c - \frac{1}{n} \dot{i}_b = \sqrt{3} \frac{1}{n} \dot{i}_c \angle -30^\circ \tag{3}$$

$$I'_a = (I_a - I_c) / \sqrt{3} \tag{4}$$

$$I'_b = (I_b - I_a) / \sqrt{3} \tag{5}$$

$$I'_c = (I_c - I_b) / \sqrt{3} \tag{6}$$

三角形侧(一次侧) A 相的电流为  $I_A$ ，它与转换后的电流  $I'_a$  同相位，因此在测取三角形侧(一次侧)的 A 相电流  $I_A$  后，需输入星形侧(二次侧)  $I_a$ 、 $I_b$  两相电流的值。其中  $I'_a$  与  $I_a$  两个向量的模不变，只是相位改变了。其他两相的电流的换算方法与 A 相的换算方法相同。

两相载波传输换算推导如下，低压侧 A、B 两相注入 20 次载波，变压器变比 25：

$$n = \frac{I_{\text{低压}}}{I_{\text{中压}}} \approx 25 \quad (7)$$

假设低压侧 A 相载波

$$I_{A\text{低}} = A \sin(\omega t), I_{B\text{低}} = A \sin(\omega t + \pi), I_{C\text{低}} = 0 \quad (8)$$

由于变压器原边副边连接方式为 Dyn11, 根据 Dyn11 方式的变压器电流换算, 低压侧转换至中压侧各相电流分别为:

$$I_{A\text{中}} = \frac{I_{A\text{低}} - I_{C\text{低}}}{\sqrt{3}n} = \frac{A}{\sqrt{3}n} (\sin(\omega t) - 0) = \frac{A}{\sqrt{3}n} \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$I_{B\text{中}} = \frac{I_{B\text{低}} - I_{A\text{低}}}{\sqrt{3}n} = \frac{A}{\sqrt{3}n} (\sin(\omega t + \pi) - \sin(\omega t)) = -\frac{2A}{\sqrt{3}n} \sin(\omega t) \quad (10)$$

$$I_{C\text{中}} = \frac{I_{C\text{低}} - I_{B\text{低}}}{\sqrt{3}n} = \frac{A}{\sqrt{3}n} (0 - \sin(\omega t + \pi)) = \frac{A}{\sqrt{3}n} \sin(\omega t) \quad (11)$$

根据公式(9)、(10)、(11), 当仅在低压侧 A、B 两相注入相同幅值的载波电流时, 中压侧 B 相电流约为低压侧 B 相电流的  $2/(25\sqrt{3})$ , 中压侧 A、C 两相的载波电流幅值为中压侧 B 电流幅值的 1/2。

通过仿真验证, 当在低压侧 A、B 两相注入相同幅值的载波信号时, 中压侧 B 相电流约为低压侧 B 相电流的  $2/(25\sqrt{3})$ , 中压侧 A、C 三相的载波电流幅值为中压侧 B 电流幅值的 1/2。仿真结果与理论计算结果基本一致。

## 2.2. 载波信号提取识别

根据传输线理论, 受波阻抗的作用, 载波信号沿配电线持续振荡衰减, 载波信号频率越低则传输距离越远, 本技术使用低频载波信号进行信号调制传输。

载波信号穿过变压器后, 在变电站侧 10kV 中压线路上进行信号提取。根据滑动 DFT 算法提取出载波信号中的电压电流谐波, 其中滑动 DFT 算法的计算公式为:

$$a_k = \frac{2}{N} \left[ \sum_{i=0}^{N-1} f\left(T_0 + i\frac{T}{N}\right) \cos\left(2\pi\frac{i}{N}\right) - f\left(T_0 + (i-N)\frac{T}{N}\right) \cos\left(2\pi k\frac{i}{N}\right) \right] \quad (12)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \left[ \sum_{i=0}^{N-1} f\left(T_0 + i\frac{T}{N}\right) \sin\left(2\pi\frac{i}{N}\right) - f\left(T_0 + (i-N)\frac{T}{N}\right) \sin\left(2\pi k\frac{i}{N}\right) \right] \quad (13)$$

其中,  $a_k$  代表第  $k$  次谐波的实部,  $b_k$  代表第  $k$  次谐波的虚部,  $N$  代表工频周波的数据点数,  $k$  代表谐波次数,  $T = 20 \text{ ms}$ ;

根据余弦相似度计算公式计算电压电流谐波波形之间的相似度, 其中余弦相似度计算公式为:

$$r_k = \frac{\sum_{n=1}^N I_k(n) U_k(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N I_k^2(n) \sum_{n=1}^N U_k^2(n)}} \quad (14)$$

其中,  $I_k$  为提取的第  $k$  次电流谐波,  $U_k$  为提取的第  $k$  次电压谐波,  $N$  为用于计算相似度的数据点数,  $r_k$  为计算得到的第  $k$  次电压电流谐波波形之间的相似度。

利用载波编码、鉴频、解码和纠错技术, 在变电站出线处的电网背景信号与载波特征信号幅值比为 10,000:1 的情况下, 载波信号识别设备仍可精确提取出载波特征信号, 保证数据传输可靠性, 完成线变关系的识别功能。

### 2.3. 编码方案

编码采用BCH (45,63)方案, 其中帧同步头(13位) + 变压器地址编号(16位) + CRC (16位) + 监督位(18位), 具体结构如图4所示:

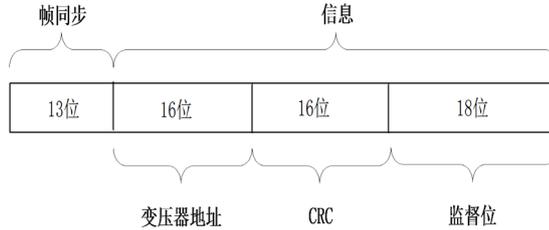


Figure 4. Original BCD code  
图 4. 原始的 BCD 码

为了使用相对阈值来降低误报率和区分所在出线, 编码方案实际发送时, 将帧同步和信息的顺序颠倒一下, 如图5所示, 这样做有2个好处: 1) 可以利用帧同步来计算载波的幅值, 而帧同步的序列可以进行一定的设置, 保证载波幅值最大; 2) 先识别出特征序列后, 再计算背景噪声, 可以提高计算准确率, 同时帧同步离背景噪声数据的时间更近, 尽量避免背景电流波动的影响。

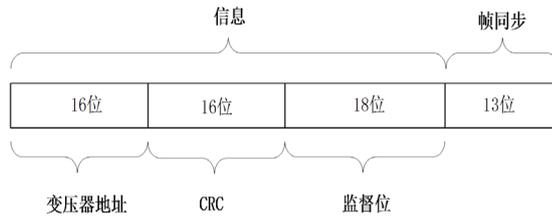


Figure 5. Adjusted BCD code  
图 5. 调整后的 BCD 码

误码率计算, 由于 BCH 可以纠正 3 位数据错误, 有五组载波频率, 每组载波频率会反复识别 4 次, 因此出现误报的概率为:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{(1 + C_{63}^1 + C_{63}^2 + C_{63}^3) \times 2^{16}}{2^{63}} \times 5 \times 4 \\
 &= \frac{(1 + 63 + 63 \times 31 + 21 \times 31 \times 61) \times 2^{16}}{2^{63}} \times 5 \times 4 \\
 &= 5.9299e-09
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

则一天出现误报的次数为:

$$N = 5.9299e-09 \times 5 \times 3600 \times 24 = 0.0026
 \tag{16}$$

即, 平均每390天发生一次误报, 误报率很小。

### 3. 应用案例

为验证青海省高海拔、远距离中压电力线负荷切改智能感知的识别效果, 在青海省果洛州班玛县的 10 kV 架空线路上进行了试点。分别选取试点 1: 变电站(莲花变) - 变压器(白玉分支), 试点 2: 变电站(班玛中心变) - 变压器(赛五路), 测试情况如表 1 所示。

**Table 1.** Test situation of intelligent perception pilot of load switching in Bama County  
**表 1.** 班玛县负荷切改智能感知试点测试情况

变电站	变压器	海拔	识别成功率
莲花变	白玉分支	4670 米	100%
班玛中心变	赛五路	4520 米	100%

在试点中,通过切改负荷测试智能感知的准确率为 100%。同时分别在四川西昌、辽宁葫芦岛、江西鹰潭、湖北武汉、襄阳、湖南长沙、安徽谢桥等多地区进行安装应用,负荷切改智能感知的识别成功率均为 100%。

#### 4. 结束语

针对目前我国中压供配电网错综复杂,线路改造混乱的问题,文中提出了一种基于中压载波通讯装置的负荷切改智能感知系统,通过现场安装测试识别准确率百分之百,可以实时准确判断负荷切改,对 10 kV 配电网的运行控制和故障诊断具有十分重要的意义。青海省人口密度较低,配电网的网络拓扑距离远,对负荷设备线变归属要求准确,负荷智能感知有利于有目标性的控制切改负荷。远距离中压电力线载波作为一种有效的有线专用通信,负荷切改智能感知为青海省的配电自动化及用电信息采集系统提供一种有效的线损治理手段,具有巨大的应用价值。

#### 参考文献

- [1] 何英静,赵伟,朱艳伟,但扬清,沈舒仪. 基于复杂网络理论的配电网中性点接地方式可靠性影响研究[J]. 电测与仪表, 2018(22): 19-24.
- [2] 伦惠勤,王佳,胡扬,赵崇,胡剑锋. 智能配电网研究现状及发展展望[J]. 电测与仪表, 2015(8): 10-15.
- [3] 郝思鹏,楚成彪,方泉,胡瑞梅,张俊. 营配调一体化平台及其关键技术研究[J]. 电测与仪表, 2014(24): 101-105.
- [4] 丁文彦,靳博,罗岩. 电力网监测中采样速率与采样精度的最优匹配[J]. 电测与仪表, 2008(12): 34-35.
- [5] 吴维德,申杰,白泰,李方硕,向景睿. 电力线载波通信抗干扰性能测试研究[J]. 电测与仪表, 2017(14): 53-56.
- [6] 金鑫,张乐平,罗鸿轩,胡珊珊. 低压电力线宽带载波通信系统发射端物理层的实现[J]. 电测与仪表, 2018(16): 78-83.
- [7] 周晓琳. 关于有效降低中低压线损率措施的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [8] 赵二刚,王艳芳,张维. 低频信号失真度测量系统设计[J]. 自动化与仪表, 2019(12): 53-56.
- [9] 饶艳文,范杏元. 高压供电计量方式的选择[J]. 电测与仪表, 2012(S1): 80-83.
- [10] 李国亮. Dyn11 型变压器高压侧一相断线引起的电压变化分析[J]. 黑龙江电力, 2018(3): 246-248.