



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران جنوب-دانشکده فنی

## پروژه پایانی

### عنوان :

بررسی و امکان سنجی در طراحی ترانسفورماتورهای ولتاژ نوری و مقایسه آن با ترانسهای معمولی

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر نیکنام

تهیه کننده :

مجید محمدی عمو دیزج

شماره دانشجویی:

۸۱۱۲۸۴۰۰۶۸

## مقدمه

انرژی الکتریکی به وسیله نیروگاههای حرارتی که معمولاً در کنار ذخایر بزرگ ایجاد می شوند و نیروگاههای آبی که در نواحی دارای منابع آبی قابل ملاحظه احداث می شوند، تولید می شود. از این رو به منظور انتقال آن به نواحی صنعتی که ممکن است صدها و هزاران کیلومتر دورتر از نیروگاه باشد، خطوط انتقال زیادی بین نیروگاهها و مصرف کننده ها لازم است.

در هنگام جاری شدن جریان در طول یک خط انتقال مقداری از قدرت انتقالی به صورت حرارت در هادیهای خط انتقال تلف می شود. این تلفات با افزایش جریان و مقاومت خط افزایش می یابد. تلاش برای کاهش تلفات تنها از طریق کاهش مقاومت، به صرفه اقتصادی نیست زیرا لازم است افزایش اساسی در سطح مقطع هادیها داده شود و این مستلزم مصرف مقدار زیادی فلزات غیر آهنی است.

ترانسفورماتور برای کاهش توان تلف شده و مصرف فلزات غیر آهنی بکار می رود. ترانسفورماتور در حالیکه توان انتقالی را تغییر نمی دهد با افزایش ولتاژ، جریان و تلفاتی که متناسب با توان دوم جریان است را با شیب زیاد کاهش می دهد.

در ابتدای خط انتقال قدرت، ولتاژ توسط ترانسفورماتور افزایش یافته می یابد و در انتهای خط انتقال توسط ترانسفورماتور کاهنده به مقادیر مناسب برای مصرف کننده ها پایین آورده می شود و به وسیله ترانسفورماتورهای توزیع پخش می شود.

امروزه ترانسفورماتورهای قدرت، در مهندسی قدرت نقش اول را بازی می کنند. به عبارت دیگر ترانسفورماتورها در تغذیه شبکه های قدرت که به منظور انتقال توان در فواصل زیاد به کار گرفته می شوند و توان را بین مصرف کننده ها توزیع می کنند، ولتاژ را افزایش یا کاهش می دهند. به علاوه ترانسفورماتورهای قدرت به خاطر ظرفیت و ولتاژ کاری بالایی که دارند مورد توجه قرار می گیرند.

تامین شبکه های ۲۲۰ کیلو ولت و بالاتر موجب کاربرد وسیع اتو ترانسفورماتور ها شده است که دو سیم پیچ یا بیشتر از نظر هدایت الکتریکی متصلند ، به طوریکه مقداری از سیم پیچ در مدارات اولیه و ثانویه مشترک است .

در پستهای فشارقوی به دو منظور اساسی اندازه گیری و حفاظت ، به اطلاع از وضعیت کمیت های الکتریکی ولتاژ و جریان احتیاج است . ولی از آنجا که مقادیر کمیت های مذکور در پستها و خطوط فشارقوی بسیار زیاد است و دسترسی مستقیم به آنها نه اقتصادی بوده و نه عملی است ، لذا از ترانسفورماتور های جریان و ولتاژ استفاده می شود . ثانویه این ترانسفورماتور ها نمونه هایی با مقیاس کم از کمیت های مزبور که تا حد بسیار بالایی تمام ویژگیهای کمیت اصلی را داراست ، در اختیار می گذارد ، و کلیه دستگاههای اندازه گیری ، حفاظت و کنترل مانند ولت متر ، آمپر متر ، توان سنج ، رله ها دستگاههای ثبات خطاها و وقایع و غیره که برای ولتاژ و جریان های پایین ساخته می شوند از طریق آنها به کمیت های مورد نظر در پست دست می یابند . بنابراین ترانسفورماتور های جریان و ولتاژ از یک طرف یک وسیله فشار قوی بوده و بنابراین می بایستی هماهنگ با سایر تجهیزات فشار قوی انتخاب شوند و از طرف دیگر به تجهیزات فشار ضعیف پست ارتباط دارند ، لذا لازم است مشخصات فنی آنها بطور هماهنگ با تجهیزات حفاظت ، کنترل و اندازه گیری انتخاب شوند .

ترانسفورماتور جریان حفاظتی جهت بدست آوردن جریان عبوری از خط انتقال یا تجهیزات دیگر در شبکه قدرت در مقیاس پایین تر به کار می روند و سیم پیچی اولیه آن بطور سری در مدار قرار می گیرد . تفاوت آن با ترانسفورماتور اندازه گیری آن است که قابلیت آن را دارد که جریانهای خیلی زیاد را به جریان کم قابل استفاده در رله ها تبدیل کند. از آنجا که در اختیار گذاشتن جریان به طور مستقیم در ولتاژ های بالا میسر نیست ، و از طرفی چنانچه امکان بدست آوردن آن نیز باشد ، ساخت وسایل حفاظتی که در جریان زیاد کارکنند به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست لذا این

عمل عمدتاً توسط ترانسفورماتورهای جریان انجام می‌شود. همچنین ترانسفورماتور جریان باید طوری انتخاب شود که هم در حالت عادی شبکه و هم در حالت اتصال کوتاه بتواند جریان ثانویه لازم و مجاز برای دستگاههای حفاظتی تامین کند.

ترانسفورماتور ولتاژ حفاظتی ترانسفورماتورهایی هستند که در آن ولتاژ ثانویه متناسب و هم‌فاز با اولیه بوده و به منظور افزایش درجه بندی اندازه‌گیری ولت‌مترها، وات‌مترها و نیز به منظور ایزولاسیون این وسایل از ولتاژ فشار قوی بکار برده می‌شود. همچنین از ثانویه ترانسفورماتور ولتاژ برای رله‌های حفاظتی که هب ولتاژ نیاز دارند نظیر رله‌های دیستانس، وات‌متری و... استفاده می‌شود. این ترانسفورماتور از نظر ساختمان به دو نوع تقسیم می‌شود که عبارتند از:

الف- ترانسفورماتور ولتاژاندکتیوی

ب- ترانسفورماتور ولتاژ خازنی

همچنین این نوع ترانسفورماتورها سد عایقی ایجاد می‌کنند به طوری‌که رله‌هایی که برای حفاظت تجهیزات فشار قوی استفاده می‌شود، فقط نیاز دارند برای یک ولتاژ نامی ۶۰۰ ولت عایق بندی شوند.

ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری: در بیشتر مدارهای قدرت، ولتاژ و جریانها بسیار زیادتر از آنستکه بشود با دستگاههای اندازه‌گیری معمولی اندازه‌گرفت. از این رو ترانسهای اندازه‌گیری بین این مدارها و وسایل اندازه‌گیری قرار می‌گیرند تا ایمنی ایجاد کنند. در ضمن مقدر اندازه‌گیری شده در ثانویه، معمولاً برای سیم پیچ‌های جریان  $1^A$  یا  $5^A$  و برای سیم پیچ‌های ولتاژ ۱۲۰ ولت است. رفتار ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان در طول مدت رخداد خطا و پس از آن در حفاظت الکتریکی، حساس و مهم است زیرا اگر در اثر رفتار نامناسب در سیگنال حفاظتی، خطایی رخ دهد، ممکن است باعث عملکرد نادرست رله‌ها شود. یک ترانسفورماتور حفاظتی نیاز است که در یک محدوده‌ای از جریان که چندین برابر جریان نامی است کار کند و اغلب در معرض شرایطی قرار دارد که بسیار

سنگین تر از شرایطی است که ممکن است ترانسفورماتور جریان اندازه‌گیری با آن مواجهه شود. تحت چنین شرایطی چگالی شار تا وضعیت اشباع پیشرفت می‌کند که پاسخ، تحت این شرایط و دوره‌گذرای اندازه‌گیری اولیه جریان اتصال کوتاه مهم است، در نتیجه به هنگام گزینش ترانسفورماتورهای ولتاژ یا جریان مناسب، مسائلی مانند دوره‌گذرا و اشباع نیز باید در نظر گرفته شود.

## ۱-۲ مقدمه

ترانسفورماتور وسیله‌ای است که انرژی الکتریکی را در یک سیستم متناوب، از یک مدار به مداری دیگر انتقال می‌دهد و در این میان ولتاژ کم را به ولتاژ زیاد و بالعکس ولتاژ زیاد را به ولتاژ کم تبدیل می‌نماید.

هر ترانسفورماتوری از دو بخش اصلی تشکیل می‌گردد:

۱- هسته که از ورقه‌های نازک فولادی ساخته می‌شود.

۲- دو یا چند سیم پیچ که با هم رابطه مغناطیسی دارند.

ترانسفورماتورها دارای انواع گوناگونی هستند که از آن جمله می توان از ترانسفورماتورهای قدرت و ترانسفورماتورهای اندازه گیری نام برد. ترانسفورماتورهای اندازه گیری از نظر تئوری عملکرد و تکنیکهای ساخت شباهت فراوانی با ترانسفورماتورهای قدرت دارند. ولی به طور کلی می توان تفاوتی را بین این دو قایل شد :

۱- نسبت تبدیل اولیه به ثانویه در ترانسفورماتورهای اندازه گیری خیلی بیشتر از ترانسفورماتورهای قدرت است .

۲- توان انتقالی در ترانسفورماتورهای اندازه گیری نسبت به ترانسفورماتورهای قدرت، خیلی کمتر است .

۳- ترانسفورماتورهای قدرت عمدتاً سه فاز می باشند در حالیکه ترانسفورماتورهای اندازه گیری اصولاً تک فاز هستند .

۴- دقت تبدیل در ترانسفورماتورهای اندازه گیری پارامتر مهمی در انتخاب آنهاست.

بدلائل فوق ترانسفورماتورهای اندازه گیری در مقایسه با ترانسفورماتورهای قدرت از دقت بالاتر و پیچیدگی بیشتری در ساخت برخوردار هستند .

در این فصل ساختمان ترانسفورماتورهای اندازه گیری وانواع آنها را بطور خلاصه شرح دهیم .

## ۲-۲- معرفی ترانسفورماتورهای اندازه گیری

ترانسفورماتورهای اندازه گیری وسایلی هستند که سطح جریان و ولتاژ شبکه را با دقت مناسب و بالایی به سطوح قابل اندازه گیری توسط رله های حفاظتی کاهش می دهند این ترانسفورماتورها در صورت تغییر در سطح جریان بنام ترانسفورماتور جریان و در صورت تغییر در سطح ولتاژ به نام ترانسفورماتور ولتاژ شناخته می شوند و به دسته های زیر تقسیم می شوند :

۱- ترانسفورماتور جریان با علامت اختصاری CT

۲- ترانسفورماتور ولتاژ

- القایی با علامت اختصاری PT

- خازنی با علامت اختصاری CVT

وظایف اصلی ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری عبارتند از :

۱- کاهش مقدار جریان یا ولتاژ فشار قوی به مقداری که قابل تحمل رله‌های حفاظتی و

مدارهای اندازه‌گیری باشد

۲- مجزا نمودن مدار اندازه‌گیری از ولتاژ فشار قوی اولیه

۳- فراهم کردن امکان استاندارد نمودن رله‌ها و تجهیزات در چند مقدار نامی جریان و ولتاژ.

۳-۲ ترانسفورماتورهای ولتاژ و انواع آن

ترانسفورماتورهای ولتاژ را می‌توان به دو دسته مغناطیسی و خازنی تقسیم کرد.

۱-۳-۲ ترانسفورماتور ولتاژ القایی

ترانسفورماتوری است که در آن با استفاده از خاصیت القاء الکترومغناطیسی، ولتاژ مدار ثانویه را

به مقدار مناسب برای وسایل اندازه‌گیری و رله‌ها تبدیل می‌کند. این نوع از ترانسفورماتورهای ولتاژ

برای ولتاژهای متوسط دارای عایق خشک رزینی هستند. در ولتاژهای بالا از ترانس‌های ولتاژ

مغناطیسی نوع غوطه‌ور در روغن استفاده می‌شود که البته معمولاً تا ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت رایج بوده

و در ولتاژهای بالاتر استفاده از آن مقرون به صرفه نمی‌باشد و بهتر است که از ترانسفورماتور خازنی

استفاده شود.



## ۲-۳-۲ ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT)

اندازه ترانسفورماتورهای ولتاژ مغناطیسی برای ولتاژهای بالا، بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد و قیمت آن نیز افزایش می یابد. لذا راه حل اقتصادی استفاده از ترانسفورماتورهای خازنی است. CVT تشکیل شده است از یک مقسم ولتاژ خازنی (CVD<sup>۱</sup>) و یک ترانسفورماتور میانی مغناطیسی (IVT<sup>۲</sup>) در شکل (۱-۲) مدار شماتیک ترانسفورماتور ولتاژ خازنی رسم شده است. سطح ولتاژ IVT معمولاً است و ولتاژ نامی CVT، نسبت مقسم ولتاژ خازنی را مشخص می کند. استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ مغناطیسی در سطوح پایین مناسبتر است و بهتر است که از CVT در ولتاژهای بالا استفاده شود. نسبت مقسم ولتاژ خازنی برابر است با:

$$K_1 = \frac{c_1 + c_2}{c_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad (۱-۲)$$

نسبت ترانسفورماتور ولتاژ میانی برابر است با:

$$K_2 = \frac{E_3}{E_2} \quad (۲-۲)$$

بنابراین ضریب نسبت برابر است با:

$$K = K_1 \times K_2 \quad (۳-۲)$$

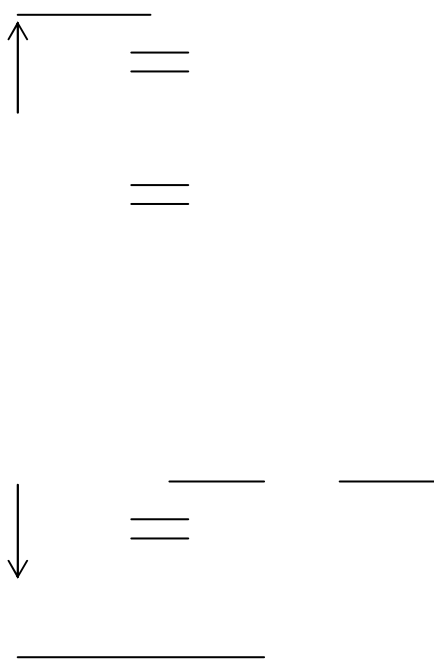
$K_1$  معمولاً طوری انتخاب می شود که مقدار  $E_2$  برابر  $\frac{22}{\sqrt{3}}$  kv شود. بنابراین در ولتاژهای اولیه

مختلف فقط  $c_1$  متفاوت است و برای کلیه ولتاژهای اولیه، یک ترانسفورماتور میانی استاندارد می تواند مورد استفاده قرار گیرد. IVT همچنین دارای راکتورهای جهت تنظیم ولتاژ خازنی است. CVT معمولاً دو وظیفه برعهده دارد، یک وظیفه در اندازه گیری و وظیفه دیگر در مخابرات شبکه قدرت (PLC<sup>۳</sup>) است.

<sup>۱</sup> Capacitive Voltage Divider

<sup>۲</sup> Intermediate Voltage Transformer

<sup>۳</sup> Power Line Carrier



شکل (۲-۱): دیاگرام اصول کار ترانسفورماتور ولتاژ خازنی

## ۲-۴ مسایل جنبی ترانسفورماتورهای ولتاژ

### ۲-۴-۱ ضریب ولتاژ

هر دو نوع ترانسفورماتور ولتاژ القایی و خازنی معمولاً بین فاز و زمین وصل می شوند . با وقوع اختلال در یک شبکه سه فاز، ولتاژ روی ترانسفورماتورها ممکن است در برخی موارد تا  $V_f$  برابر ولتاژ نامی افزایش یابد .  $V_f$  ضریب ولتاژ نام دارد . استاندارد IEC ضرایب ولتاژ زیر را مشخص کرده است :

- ۱/۹، برای سیستمهایی که خوب زمین نشده اند.

- ۱/۵، برای سیستمهایی با صفر خوب زمین شده

هسته ترانسفورماتور نباید در ضریب ولتاژ اشباع شود . در اندازه گیریهای دقیق، مهم است که ترانسفورماتور در دماهای مختلف درست کار کند . یک ترانسفورماتور القایی در دماهای مختلف دارای انحرافات جزئی است در حالیکه CVT های دارای عایق کاغذ تنها، تغییرات بزرگی را بخاطر تغییرات

ظرفیت نشان می دهند. در یک CVT مدرن، عایق از دو نوع ماده مختلف تشکیل می شود، کاغذ و پلی پروپیلن، که دارای مشخصه های حرارتی متضاد هستند و ترکیبشان حداقل انحراف را بدست میدهد به این ترتیب میزان انحراف به حدود موارد مربوط به ترانسفور در القایی محدود می شود.

## ۲-۴-۲ آلودگی

از مسایل دیگر مربوط به CVTها آلودگی محیط است که روی دقت آنها تاثیر منفی می گذارد به دلیل آلودگی روی مقره ها جریانهای خزش جاری شده، می توانند دقت CVT را تحت تاثیر قرار دهند. هنگامی که یک مقره چینی به قسمتهای متعددی تقسیم شده، جریانهای خزشی مختلفی در قسمتهای مختلف CVT جاری می شود. این جریانها بر تقسیم ولتاژ در خازن اثر گذاشته و باعث بروز خطای نسبت می گردد. تخمین میزان این خطاها کار مشکلی است همچنانکه اندازه گیری جریانهای خزشی چندان آسان نیست. خازن بزرگتر در مقسم ولتاژ از حسایت نسبی به آلودگی می کاهد.

## ۳-۴-۲ ظرفیت پراکندگی

از عوامل دیگر تاثیر گذار روی دقت، تاثیر ظرفیت پراکندگی ناشی از تجهیزاتی که نزدیک به هم نصب شده اند است. البته این تاثیر قابل چشم پوشی است مثلاً اگر دو CVT، ۴۲۰ کیلو ولت در فاصله ۱/۲۵ متر از هم نصب شوند خطای نسبت ایجاد شده در یکی از CVTها ناشی از دیگری ۰/۰۱٪ خواهد بود. فاصله معمول فازها خیلی بیشتر از این مقدار است. خازن زیاد مقسم ولتاژ در اینجا هم تاثیر مثبتی روی دقت دارد.



### ۱-۳ مقدمه

در سالهای اخیر، مبحث نورشناسی به صف مقدم تفکر علمی و تکنولوژی راه یافته است. یک رشته کارهای قابل ملاحظه در این زمینه انجام شده و دلایلی برای امید داشتن به چیزهای شگفتی آفرین در افقهای آینده خود نمایی میکنند. این علم به اعتبار و سابقه و تعبیری که بر شالوده ساختار نظریه الکترومغناطیس بنا نهاده شده است، هرگز مرجعیت خود را از دست نداده است. در طول تاریخ فیزیک مفاهیم مربوط به نور شناسی توسعه و گسترش فراوانی یافته است به طوری که در حال حاضر، دستگاههای نور شناختی بطور فزایندهای در زمینه های پزشکی و بهداشت، صنعت، کشاورزی و موارد متعدد دیگر، مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله صنایعی که در سالهای اخیر، دستگاههای نور شناختی در آن کاربرد فراوانی پیدا کرده است، صنعت برق است. در این صنعت برای انتقال اطلاعات استفاده از فیبر نوری رایج است و استفاده از المانهای نوری برای اندازه گیری جریان و ولتاژ هم در حال گسترش است. در این فصل برای آشنایی با دستگاههای نوری، مروری بر

و ماهیت و مبانی نور می شود و به تعدادی از پدیده های مربوط به انتشار نور در محیط های مادی پرداخته می شود .

### ۲-۳ ماهیت نور

در طول تاریخ مفاهیم مربوط به ماهیت نور دچار تغییرات چند ی شده است ، تا اوایل قرن هفدهم عقیده بر این بود که نور متشکل از جریان ذرات بسیار ریزی است که از منابع روشنایی انتشار می یابد . بعداً در سال ۱۸۶۴ ماکسول به شکل تئوری نشان داد که امواج نوری از جنس امواج الکترو مغناطیسی هستند . به علاوه مشاهده آثار پلاریزاسیون معلوم کرد که امواج نوری از نوع عرضی هستند یعنی حرکت موج عمود بر جهتی است که در آن موج عبور می کند. امواج نوری زیر مجموعه ای از امواج الکترومغناطیس هستند که فرکانس آنها در محدوده  $۱۰^{۱۴} * ۳/۹$  تا  $۱۰^{۱۴} * ۷/۹$  قرار دارد به طور معادل طیف نوری در فضای آزاد با طول موج  $۳۸۰^{nm}$  تا  $۷۶۰^{nm}$  مشخص می شود.

هر موج الکترومغناطیسی از ترکیب دو میدان الکتریکی E و میدان مغناطیسی B تشکیل می شود . توزیع میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در یک ردیف امواج الکترومغناطیس صفحه ای و در یک لحظه معین از زمان، در شکل (۱-۳) ملاحظه می شود . براساس معادلات ما کسول می توان نشان داد که E و B هر دو بر جهت انتشار موج K عمودند به علاوه میدانهای E و B خودشان نیز بر یکدیگر عمودند . در این صورت همانطور که در شکل (۱-۳) هم مشخص است ، بردارهای E و B و K تشکیل بردارهای قائم را می دهند .

شکل (۳-۱): توزیع میدانهای امواج الکترومغناطیسی در یک لحظه معین از زمان

### ۳-۳ بررسی نور پلاریزه شده

همانطور که قبلاً اشاره شده نور را می توان با نوسانات میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی که بر جهت انتشار موج و نیز بر یکدیگر عمودند نشان داد. بنابر تعریف پلاریزاسیون، مشخصات زمانی و مکانی بردار الکتریکی موج نور، نوع پلاریزاسیون نور را مشخص می کند اگر بردار الکتریکی یک پرتو نور همیشه در یک صفحه باشد، به آن نور پلاریزه خطی می گویند. در این صورت بردار الکتریکی نور روی یک خط ثابت حرکت می کند و مقدار و علامت آن تغییر می کند. صفحه ای که بردار الکتریکی در آن نوسان می کند، را صفحه ارتعاش می نامند. این صفحه علاوه بر بردار الکتریکی شامل بردار انتشار نیز هست و به این صفحه، صفحه پلاریزاسیون هم می گویند. توجه به این نکته لازم است که بدلیل آنکه در موج نور شدت میدان  $E$  بزرگتر از میدان  $B$  است حالت، پلاریزاسیون نور با جهت میدان الکتریکی  $E$  بیان می شود.

حال فرض کنید که دو موج نوری داریم که بطور خطی پلاریزه شده اند فرکانس آنها یکسان است و همچنین در یک راستا در حال حرکت هستند اگر بردارهای الکتریکی این دو موج با هم همراستا باشند ترکیب دو موج، موجی با پلاریزاسیون خطی است. اگر میدانهای الکتریکی دو موج برهم عمود باشند پلاریزاسیون موج برآیند بستگی به اختلاف فاز نسبی دو موج و دامنه آنها دارد. برای درک بهتر این موضوع، فرض کنید که بتوان دو موج اشاره شده را بصورت زیر نوشت:

$$E_x(z,t) = E_{ox} \cos(\omega t - hz) \quad (۱-۳)$$

$$E_y(z,t) = E_{oy} \cos(\omega t - hz + \varphi) \quad (۲-۳)$$

در اینجا  $E_{ox}$  و  $E_{oy}$  نشان دهنده دامنه موج و  $h$  ثابت انتشار موج است که برابر  $2\pi/\lambda$  است و  $\lambda$

هم طول موج نور می باشد. همچنین  $\varphi$  اختلاف فاز نسبی دو موج است و  $\omega = 2\pi f$  که  $f$  فرکانس نور می

باشد. این دو معادله نشان دهنده امواجی هستند که در جهت محور  $Z$  حرکت می کنند. در این حال موج برآیند برابر است:

$$E(z,t) = iE_x(z,t) + jE_y(z,t) \quad (3-3)$$

که  $i$  و  $j$  بردارهای واحد محورهای  $x$  و  $y$  هستند. موج برآیند با توجه به حالت‌های معادلات (۳-۳) (۱) و (۲-۳) می تواند دارای پلاریزاسیون خطی یا دایره یا بیضوی باشد در ادامه این حالتها را بررسی می کنیم.

### ۱-۳-۳ نور پلاریزه شده خطی

اگر در معادله (۲-۳)  $\varphi_0$  صفر یا مضرب صحیحی از  $2\pi$  باشد دو موج با یکدیگر هم فازند بنابراین موج برآیند یک موج با پلاریزاسیون خطی خواهد بود که برابر است با:

$$E(z,t) = (iE_{ox} + jE_{oy}) \cos(\omega t - hz) \quad (4-3)$$

در این حالت بردار پلاریزاسیون با محور  $x$  زاویه

$$\theta = \text{Arc tan}\left(\frac{E_{ox}}{E_{oy}}\right) \quad (5-3)$$

می سازد که بزرگی موج برآیند هم برابر است با

$$E = (E_{ox}^2 + E_{oy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6-3)$$

### ۲-۳-۳ نور پلاریزه شده دایره ای

اگر معادلات (۱-۳) و (۲-۳) دارای شرایط زیرباشند:

$$\theta = -\frac{\pi}{2} + 2m\pi \quad m = 0,1,2,\dots \quad (7-3)$$

$$E_{ox} = E_{oy} = E_o \quad (8-3)$$



آنگاه موج برآیند برابر است با :

$$E(z,t) = E_o (i \cos(\omega t - hz) + j \sin(\omega t - hz)) \quad (9-3)$$

در اینجا دامنه  $E$  ثابت است ولی راستای آن با زمان تغییر می کند و حرکت آن محدود به یک صفحه نیست چنین موجی را پلاریزه دایره ای راستگرد می نامند . در این حالت انتهای بردار الکتریکی روی یک دایره حرکت می کند . اگر معادله (۳-۷) به صورت :

$$\theta = \frac{\pi}{2} + 2m\pi \quad m = 0,1,2,\dots \quad (10-3)$$

دریاید و شرط (۳-۸) همچنان برقرار باشد ، آنگاه موج برآیند موج پلاریزه دایره ای چپگرد خواهد بود . با توجه به روابط موج پلاریزه دایره ای راستگرد و چپگرد و مقایسه آنها با موج پلاریزه خطی ملاحظه می شود که موج پلاریزه خطی را می توان به صورت ترکیبی از دو موج پلاریزه دایره ای راستگرد و چپگرد نوشت .

### ۳-۳-۳ نور پلاریزه شده بیضوی

پلاریزاسیون بیضوی حالت کلی پلاریزاسیون خطی و دایره ای است . در این نوع پلاریزاسیون بردار  $E$  هم می چرخد و هم دامنه اش تغییر می کند . در این مورد نقطه انتهایی بردار  $E$  ضمن چرخش در صفحه ای که بر  $h$  عمود است ، یک بیضی رسم می کند . با توجه به معادلات (۳-۱) و (۳-۲) می توان رابطه زیر را نوشت :

$$\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{ox}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{oy}}\right) \cos \varphi = \sin^2 \varphi \quad (11-3)$$

این رابطه ، معادله یک بیضی است که با محور مختصات  $(E_x, E_y)$  زاویه  $\alpha$  می سازد (شکل ۳-۳)

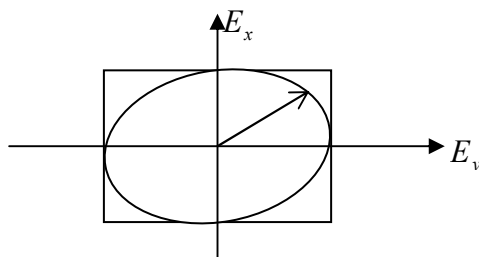
(۲) . زاویه  $\alpha$ ، از رابطه زیر بدست می آید :

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{ox}E_{oy}}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2} \quad (12-3)$$

با توجه به معادلات (۱۱-۳) مشاهده می کنیم که اگر  $E_{ox} = E_{oy}$  باشد و  $\varphi = \pm(2k+1)\frac{\pi}{2}$ ،

آنگاه معادله (۱۱-۳) به معادله یک دایره تبدیل می شود. همچنین اگر  $\varphi$  مضرب صحیحی از  $2\pi$

باشد، رابطه (۱۱-۳) به معادله خط مستقیم تبدیل می شود.



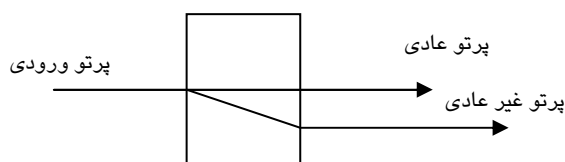
شکل (۲-۳): نور پلاریزه شده بیضوی

### ۴-۳ پدیده دو شکستی

وقتی یک پرتو نور وارد یک محیط همگن مانند آب یا شیشه می شود و در خروجی محیط تنها یک پرتو بوجود می آید اما در بعضی مواد بلورین مانند کلسیت نور خروجی به دو قسمت تقسیم می شود. این نوع مواد جزو مواد بلورین غیر همگن می باشند. سرعت نور در این نوع مواد برجهت انتشار و جهت نوسانات نور بستگی دارد. اگر یک پرتو نور وارد مواد غیر همگن شود، در خروجی ماده دو پرتو نور خواهیم داشت که در جهت های مختلف انتشار می یابند. این دو پرتو پلاریزه شده خطی هستند و بر یکدیگر نیز عمودند. این پدیده به عنوان پدیده دوشکستی معروف است.

برای کلسیت و بلورهای دیگر جهتی وجود دارد که اگر چند پرتو نور در آن جهت وارد ماده شوند بدون توجه به جهت نوسانات پرتوها، سرعت آنها یکسان است. این جهت بعنوان محور نوری بلور شناخته می شود و به این نوع بلورها، بلورهای تک محور گفته می شود، پس اگر یک پرتو در راستای محور نوری یک بلور وارد آن نشود سرعت آن پرتو و در نتیجه ضریب شکست به جهت نوسانات نور بستگی دارد. با این توجه مشاهده می شود که در خروجی بلور دو پرتو شکست داریم که پلاریزه خطی و عمود برهم هستند در این حالت نور ورودی به دو جزء عمود بر هم تجزیه شده است و

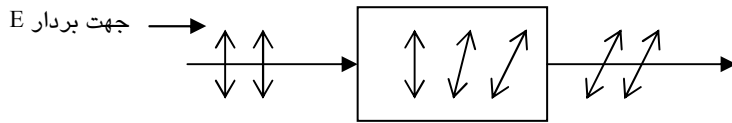
دو جزء با سرعت‌های مختلف مسیر بلور را طی می‌کنند و چون سرعت‌های آنها متفاوت است، مسیر انتشار آنها هم متفاوت است. در شکل (۳-۳) یکی از این دو پرتو شکست رفتار معمولی دارد بطوریکه همچنان در صفحه نور ورودی قرار دارد و ضریب شکست آن پرتو ثابت است. این پرتو به عنوان پرتو عادی شناخته می‌شود و ضریب شکست آن  $n_0$  نامیده می‌شود. اما پرتو دیگر رفتار غیر عادی دارد بطوریکه در صفحه عمود بر صفحه نور ورودی قرار دارد و سرعت آن تابع جهت انتشارش در بلور است این پرتو به عنوان پرتو غیر عادی شناخته می‌شود و ضریب شکست مربوط به آن هم ضریب شکست غیر عادی یا  $n_e$  نامیده می‌شود.



شکل (۳-۳): پدیده دو شکستی در یک بلور کلسیت

### ۵-۳ فعالیت نوری

در سال ۱۸۱۱ دومینیک آراگو فیزیکدان فرانسوی برای اولین بار پدیده شگفتی را مشاهده کرد که امروزه به نام فعالیت نوری مشهور است. وی کشف کرد وقتی یک پرتو خطی در راستای محور نوری یک صفحه کوارتز منتشر می‌شود صفحه ارتعاش آن چرخش پیوسته پیدا خواهد کرد. شکل (۳-۴) نمایانگر این امر است. هر نوع ماده از این نوع که باعث می‌شود میدان  $E$  یک موج خطی بچرخد، می‌گویند فعالیت نوری دارد. اگر چرخش نور در جهت راستگرد باشد ماده را سنگرد می‌گویند و اگر چرخش نور در جهت چپگرد باشد ماده را چپگرد می‌گویند.



شکل (۳-۴) : پدیده فعالیت نوری در کوآرتز

همانطور که قبلاً گفته شد ، هر موج خطی را می توان یک ترکیبی از موجهای دایره ای راستگرد و چپگرد دانست .

بنابراین می توان فرض کرد که موقع انتشار نور خطی از ماده فعال نوری این دو حالت نور دایره ای با سرعتهای مختلف انتشار می یابند . پس یک ماده فعال نوری پدیده دو شکستی دایره ای از خود نشان می دهد یعنی دارای دو ضریب شکست است. یکی برای نور دایره ای راستگرد  $n_r$  و یکی برای نور دایره ای چپگرد  $n_L$  . موج دایره ای هنگام عبور از ماده فعال نوری از حالت هم فازی خارج می شود آنگاه در خروجی ماده به نظر می رسد که موج خطی چرخیده است بنابراین در مواردی به جای استفاده از لفظ فعالیت نوری از اصطلاح دو شکستی دایره ای استفاده می شود.

اگر ضخامت ماده فعال نوری  $d$  باشد، آنگاه مقدار زاویه چرخش صفحه ارتعاش برابر است با :

$$\beta = \frac{2\pi d}{\lambda_0} (n_L - n_r) \quad (۳-۱۳)$$

که  $\lambda_0$  طول موج نور است. مطابق رابطه (۳-۱۳) اگر  $n_L > n_r$  باشد ماده راستگردان است و اگر  $n_L < n_r$  باشد ماده چپگردان است.

توان گردان نوری اصطلاحی است که در مورد مواد فعال نوری بکار می رود و نشان دهنده میزان قدرت یک ماده فعال نوری در گرداندن صفحه ارتعاش نور خطی ورودی به آن ماده است. توان گردان ویژه هر ماده بصورت  $\beta/d$  تعریف می شود و با  $\phi$  نمایش داده می شود که واحد آن  $\text{rad/m}$  یا  $\text{deg/m}$  است برای مثال مقدار توان گردان ویژه برای کوآرتز  $10^3 \text{ deg/m} * 21/7$  است.

بلورهای دو شکستی دیگری نیز که از نظر نوری فعال هستند ، مانند نیسabarHgS که توان گردان نوری آن  $10^3 \text{ deg/m} * 32/5$  است وجود دارند . در مقابل ماده  $\text{NaClO}_3$  از لحاظ نوری فعال است ولی دو شکستی نیست . توان گردان مایعات در مقایسه با مواد بلورین خیلی کوچکتر است.

### ۳-۶ اثرهای نوری القائی

اگر نوری قطبی شده خطی وارد یک محیطی شود که تحت عوامل خارجی مانند نیروهای مکانیکی ، میدان مغناطیسی یا میدان الکتریکی قرار دارد نور عبوری از آن محیط تغییر می کند . از میان این عوامل ، میدان مغناطیسی باعث ایجاد اثر فارادی و میدان الکتریکی باعث ایجاد اثرهای کر و پاکلز می کند که از آنها برای اندازه گیری ولتاژ و جریان استفاده می شود یک بیان کلی برای این سه اثر عبارت است از :

$$\Delta n = \alpha + \beta F + \gamma F^2 \quad (3-14)$$

در این رابطه  $\Delta n$  نشان دهنده تغییر ضریب شکست ماده ،  $F$  نشان دهنده میدان مغناطیسی یا الکتریکی و  $\alpha$  ،  $\beta$  و  $\gamma$  هم ضرایب ثابت هستند . اگر  $F$  میدان الکتریکی و  $\gamma = 0$  باشد ، آنگاه رابطه (۳-۱۴) اثر پاکلز را توصیف می کند . همچنین اگر  $F$  میدان الکتریکی و  $\beta = 0$  باشد ، آنگاه رابطه (۳-۱۴) اثر کر را بیان می کند . اگر  $F$  میدان مغناطیسی و  $\gamma = 0$  باشد آنگاه رابطه (۳-۱۴) معرف اثر فارادی است . در ادامه هر یک از این سه اثر را به طور کاملتر بیان می کنیم.

### ۳-۶-۱ اثر فارادی

مایکل فارادی در سال ۱۸۴۵ کشف کرد که شیوه انتشار نور در یک محیط مادی می تواند تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی قرار گیرد . او به خصوص دریافت که اعمال یک میدان مغناطیسی قوی در امتداد انتشار نور خطی که روی یک قطعه از شیشه فرود می آید باعث چرخش صفحه ارتعاش آن

می شود. اثر فارادی از اثرهای مغناطیس-نوری (magneto optic effect) است که حاکی از فعالیت نوری است رابطه توصیف کننده این اثر عبارت است از :

$$n_r - n_L = \frac{\lambda VH}{2\pi} \quad (۱۷-۳)$$

که در آن  $n_r$  ضریب شکست برای نور دایره ای راستگرد،  $n_L$  ضریب شکست برای نور دایره ای چپگرد،  $\lambda$  طول موج نور،  $V$  یک ضریب تناسب با نام ثابت وردت و  $H$  چگالی شار مغناطیسی است. ثابت وردت یکی از خصوصیات فیزیکی مواد است که برحسب rad/A یا deg/A بیان می شود. ثابت وردت یک ماده به فرکانس و دما وابسته است. برحسب قرار داد یک ثابت وردت مثبت متناظر است با یک ماده دیا مغناطیسی که برای آن در صورتیکه نور موازی میدان اعمال شده  $B$  حرکت کند اثر فارادی چپگردان است. وقتی در راستای غیرموازی با  $B$  انتشار یابد، راستگردان است. اگر رابطه ۳-۱۰ را برحسب میزان چرخش صفحه ارتعاش نور خطی بیان کنیم، داریم :

$$\theta_f = V \int H \cdot dl \quad (۱۷-۳)$$

چون در اکثر مواقع آرایش فیزیکی محیط فارادی طوری است که  $H \cdot dl$  برابر  $H \times L$  است، بنابراین رابطه بالا را می توان به صورت زیر نوشت :

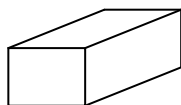
$$\theta_f = VHL \quad (۱۷-۳)$$

که در آن  $L$  طول محیط فارادی است. شکل ۳-۵ نشان دهنده اثر فارادی در یک بلور است. موادی که دارای اثر فارادی هستند به دو دسته تقسیم می شوند دسته اول موادی هستند که هیچ ممان مغناطیسی خالص ندارند یعنی مواد دیا مغناطیس و دسته دوم مواد پارامغناطیس هستند که دارای ممان مغناطیسی می باشند. اثر فارادی در مواد دیا مغناطیس به حرکت الکترونها بستگی دارد و به جهت مولکولی وابسته نیست، در نتیجه اثر فارادی در این مواد تا حدودی از حرارت مستقل است. اما اثر فارادی در مواد پارامغناطیس از جهت گیری مولکولها نتیجه می شود، بنابراین این اثر در مواد پارامغناطیس وابستگی زیادی به حرارت دارد همچنین ثابت وردت در مواد پارامغناطیس از

ثابت وردت در مواد دیا مغناطیس بزرگتر است . لازم به ذکر است که اثر فارادی علاوه بر مواد دیا مغناطیس و پارا مغناطیس در موادی مانند پلاسما ، نیمه هادیها و فریتها نیز اتفاق می افتد که در بعضی موارد ارجحیت دارند . در جدول ۳-۱ مقادیر ثابت وردت برای چند ماده انتخابی آمده است .

نوع ماده	مشخصه ماده	ثابت وردت (rad/A)	طول موج نور
BSO	-----	$3/66 \times 10^{-5}$	۸۷۰
YIG	TYPE 1	$3/07 \times 10^{-2}$	۱۱۵۰
YIG	TYPE 2	$9/89 \times 10^{-2}$	۱۱۵۰
Quartz(SF-57)	-----	$0/31 \times 10^{-5}$	۸۱۰

جدول ۳-۱ : مقادیر ثابت وردت برای چند ماده



شکل (۳-۵) : یک بلور نشان دهنده اثر فارادی

### ۳-۶-۲ اثر کر

اثر کر جزء اثرهای الکترو نوری است که اولین بار توسط جان کر در سال ۱۸۷۰ کشف شد . او دریافت وقتی که یک ماده شفاف همگن در یک میدان الکتریکی قرار گیرد دو شکستی می شود . این محیط مشخصه یک بلور تک محور به خود می گیرد که محور نوری آن با امتداد میدان اعمال شده یکسان است . این دو ضریب شکست  $n_L$  و  $n_\pi$  همراه با دو جهت ارتعاش موج یعنی به ترتیب موازی و عمود بر میدان الکتریکی اعمال شده ، هستند . اختلاف این دو ضریب شکست ،  $\Delta n$  دو شکستی را نشان می دهد و برابر است با :

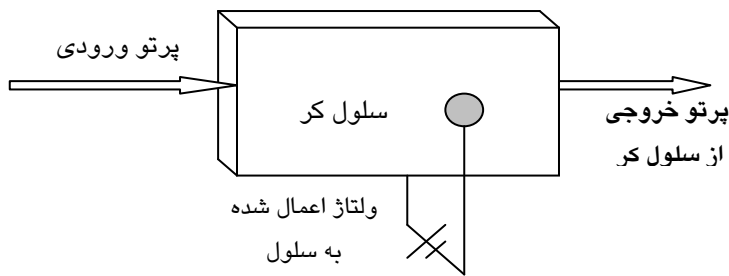
$$\Delta_n = \lambda_0 k E^2 \quad (18-3)$$

که در این روابط  $k$  ثابت کر و  $\lambda_0$  طول موج نور در خلاء است. اگر  $k$  مثبت باشد،  $\Delta_n$  معادل  $n_e - n_o$  است. ثابت کر برحسب  $n/v^2$  بیان می شود. اثر کر بیشتر در مایعات رخ می دهد. در جدول ۳-۲ مقادیر ثابت کر برای چند مایع برگزیده آمده است. توجه کنید که اثر کر با مجذور میدان الکتریکی متناسب است و جهت میدان هم باید برجهت عبور نور عمود باشد در حالیکه در اثر فارادی میدان مغناطیسی با جهت تابش نور موازی بود.

در شکل ۳-۶ نمایی از یک سیستم کر آمده است که میدان الکتریکی توسط دو الکتروود تامین می شود. اگر طول صفحه الکتروودها  $L$  و فاصله آنها از هم  $d$  باشد، با توجه به رابطه ۳-۱۸ تاخیر ایجاد شد توسط اثر کر برابر است با:

$$\theta_k = \frac{2\pi k L v^2}{d^2} \quad (19-3)$$

که در این رابطه ولتاژ شده به سلول است.



شکل (۳-۶): یک سلول کر

نوع ماده	ثابت کر
آب ( $H_2O$ )	$5/2 \times 10^{-14}$
کلروفرم ( $CHCl_3$ )	$3/7 \times 10^{-14}$
نیترو بنزن ( $C_6H_5NO_2$ )	$2/4 \times 10^{-12}$
بنزین ( $C_6H_6$ )	$4/4 \times 10^{-12}$



جدول (۳-۲) : مقادیر ثابت کر برای چند ماده

### ۳-۶-۳ اثر پاکلز

یک پدیده مهم الکترو نوری دیگری هم وجود دارد که در سال ۱۸۹۳ توسط فردریش پاکلز کشف شد که به نام این فیزیکدان اثر پاکلز نامیده می شود. این اثر الکترو نوری، یک پدیده خطی است زیرا دو شکستی القایی یا توان اول میدان اعمال شده،  $E$ ، و بنابراین با ولتاژ اعمال شده متناسب است. معادله اصلی توصیف کننده این اثر عبارتست از:

$$\Delta_n = n^3 r_{63} E \quad (۳-۲۰)$$

که در این رابطه  $r_{63}$  ثابت الکترو نوری برحسب  $m/v$ ،  $n$  ضریب شکست معمولی و  $E$  میدان اعمال شده است. چون بلورهای تمامی ناهمسان هستند خواص آنها در جهت های مختلف تغییر می کند و باید آنها را توسط تانسورهای مرتبه دوم توصیف کرد در اینجا فقط نیاز به یکی از مولفه های این تانسور یعنی  $r_{63}$  داریم. اگر رابطه (۳-۲۰) را برحسب اختلاف فاز ایجاد شده توسط اثر پاکلز بیان کنیم داریم:

$$\theta_p = 2\pi n^3 r_{63} \frac{v}{\lambda_0} \quad (۳-۲۱)$$

در مورد اثر پاکلز اصطلاحی را تعریف می کنند به نام ولتاژ نیم موج که با مقدار  $\theta_p = \pi$  متناظر

است. در این صورت

$$\theta_p = \pi \frac{v}{v_{\frac{\lambda}{2}}} \quad (۳-۲۲)$$

که  $v_{\frac{\lambda}{2}}$  همان ولتاژ نیم موج است و برابر است با:

$$v_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{\lambda_0}{2n^3 r_{63}} \quad (۳-۲۳)$$

ولتاژ نیم موج یکی از مشخصات فیزیکی ماده دارای اثر پاکلز است که به ابعاد آنها بستگی ندارد . در جدول ۳-۳ مقادیر  $r_{63}$  ،  $n$  و  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  چند ماده انتخابی آمده است . همچنین در شکل ۷-۳ نحوه تاثیر اثر پاکلز روی نور خطی ورودی نشان داده شده است .

شکل ( ۷-۳ ) : اثر سنسور پاکلز روی یک پرتو نور خطی

طول موج	$V_{\frac{\lambda}{2}} (KV)$	$n_o$	$r_{63}(m/v)$	نوع ماده
۸۷۰	۶/۸	۳/۲	$1/95 * 10^{-12}$	$Bi_{12}SiO_{20} (BSO)$
۵۵۰	۹/۲	۱/۵۲	$8/5 * 10^{-12}$	$NH_4H_2PO_4 (ADP)$
۱۰۶۰	۱۴/۵	۱/۵۱	$10/6 * 10^{-12}$	$KH_2PO_4 (KDP)$
۸۳۰	۱/۳۳	۲/۱۷۵	$30/3 * 10^{-12}$	$LiTaO_3$
۸۳۰	۱/۱۲۲	۲/۲۹	$30/8 * 10^{-12}$	$LiNbO_3$

جدول ۳-۳: مقادیر  $r_{63}$  ،  $n$  و  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  چند ماده انتخابی

مطالبی که تا اینجا در مورد اثر پاکلز گفته شد ، با شرط موازی بودن میدان الکتریکی با جهت انتشار نور بود . از طرف دیگر می توان میدان را عمود بر جهت انتشار نور گرفت . در این صورت ، میدان الکتریکی فقط باعث ایجاد اختلاف فاز نمی شود بلکه اختلاف فاز ایجاد شده متناسب با حاصلضرب میدان در طول کریستال است بنابراین می توان با تغییر طول کریستال ، اختلاف فاز را تغییر داد در حالیکه در حالت قبل اختلاف فاز مستقل از طول کریستال بود . به این حالت کار سیستم ، مد عرضی سیستم پاکلز گفته می شود و به حالت قبل که میدان موازی جهت انتشار نور بود مد طولی سیستم گفته می شد . اختلاف فاز در مد عرضی برابر است با :

$$\theta_p = 2\pi n^3 r_{63} \frac{vL}{\lambda d} \quad (24-3)$$

که  $L$  طول کریستال و  $d$  عرض کریستال (در جهت میدان) است .

### ۷-۳ معرفی المانهای مهم نوری

در این بخش المانهای اصلی که در یک سیستم نوری اندازه گیری جریان و ولتاژ استفاده می شوند به طور مختصر معرفی می شوند .

#### ۷-۳-۱ منابع نور

منابع اصلی نوری که در سیستم های مختلف نوری مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از دیودهای لیزری که به آنها دیودهای لیزر تزریقی یا  $ILD$  نیز می گویند و دیودهای نور گسیل یا  $LED$  . توان خروجی این دو نوع دیود نوری با تغییر جریان ورودی به آنها مستقیماً تغییر می کند همچنین بازده بالایی دارند و مشخصات ابعادی آنها با اندازه تارهای نور سازگار است . یکی از تفاوت های بین دیودهای  $LED$  و لیزر این است که نور خروجی از دیود  $LED$  ناهمدوس است در حالیکه نور خروجی از دیود لیزر همدوس است به این معنا که پرتو خروجی از لیزر بسیار تکفام و جهت دار است و قابل تزریق به هر یک از تارهای نوری تک مدی یا چند مدی است در حالیکه نور  $LED$  فقط قابل تزریق به تارهای چند مدی است . هر چند توان خروجی کمتری نسبت به دیودهای لیزری دارند ولی دلایلی از قبیل ساخت راحت تر، قیمت پایین تر نیاز به دیودهای مدارها ساده تری جهت کنترل و طول عمر بیشتر آنها نسبت به دیوهای لیزری موجب شده است که در بسیاری از کاربردها از این دیودها استفاده شود .

#### ۷-۳-۲ تار نوری

یکی از اجزایی که معمولاً در هر سیستم نور استفاده می شود تار یا فیبر نوری است . تار نوری موجبر عایقی است که در فرکانسها نوری کار می کند . تار نوری انرژی الکترو مغناطیسی را به شکل نور در داخل سطوح خود محصور و آن را در جهت موازی با محورش هدایت می کند . انتشار نور در امتداد تار را می توان بر حسب یک سری از امواج الکترومغناطیسی هدایت شده به نام مدهای موجبر توجیه کرد . هر یک از مدهای هدایت شده الگویی از خطوط میدان الکتریکی و مغناطیسی هستند که در امتداد تار با فاصله های برابر با یک طول موج تکرار می شوند . تارها از نظر تعداد مدهای قابل انتشار در آنها ، به دو طبقه تک مدی و چند مدی تقسیم می شوند . تار تک مدی تنها حامل یک مد انتشار است در حالیکه تار چند مدی شامل صدها مد انتشار است . تارهای چند مدی دارای مزایای زیادی نسبت به تارهای تک مدی هستند از جمله این مزایا شعاع بزرگ هسته تار چند مدی است که می توان به راحتی توان نوری را به داخل آنها تزریق کرد . بنابراین استفاده از  $LED$  در جایی که از تار چند مدی استفاده می شود امکان پذیر است . اگر چه آرایشهای گوناگونی برای تارهای نوری معرفی شده است ، بهترین ساختار پذیرفته شده استوانه عایق و جامد با ضریب شکست  $n_1$  است . این استوانه موسوم به هسته تار است ، هسته با ماده جامد و عایق دیگری به نام پوشش که دارای ضریب شکست  $n_2 < n_1$  است احاطه می شود . در اکثر تارها ، ماده هسته معمولاً از شیشه است که با پوشش شیشه ای یا پلاستیکی احاطه می شود . بعلاوه بیشتر تارها را با رو پوش قابل انعطاف دیگری از ماده پلاستیکی مقاوم در برابر ساییدگی ، محافظت می کنند .

### ۳-۷-۳ قطبشگر<sup>۴</sup>

قطبشگر وسیله‌ای است که بدون توجه به حالت پلاریزاسیون نور ورودی به آن، پرتو خروجی از آن دارای پلاریزاسیون خطی می‌باشد. عمل قطبی کردن نور به دو روش انعکاس نور یا انتقال آن صورت می‌گیرد. جهت نوسان نور پلاریزه شده خطی یکی از خصوصیات مهم قطبشگر است که به آن محور قطبشگر گفته می‌شود چون بیشتر قطبشگرها با روش انتقال، نور را خطی می‌کنند به این محور، محور انتقال هم می‌گویند. همانطور که قبلاً اشاره شد در پدیده دو شکستی پرتوهای خروجی از بلور دارای پلاریزاسیون خطی هستند بنابراین برخی از قطبشگرها بر اساس این پدیده ساخته می‌شوند و می‌توان در خروجی قطبشگر دو پرتو خطی عمود بر هم داشت.

در سیستمها نوری که جهت اندازه‌گیری جریان و ولتاژ استفاده می‌شوند از دو قطبشگر استفاده می‌شود که یکی از آنها نور خطی تولید می‌کند و همان قطبشگر است و دیگری هر تغییری که در پلاریزاسیون نور در طی مسیر بین دو قطبشگر روی داده است را آنالیز می‌کند و معمولاً به نام آنالیز کننده شناخته می‌شود.

### ۳-۷-۴ تیغه ربع موج و نیمه موج<sup>۵</sup>

همانطور که در مبحث دو شکستی بیان شد، نور خروجی از بلور ناهمگن به دو پرتو عادی و غیر عادی تقسیم می‌شود. چون ضریب شکست یک صفحه برای پرتوهای عادی و غیر عادی متفاوت است پس بین پرتوهای خروجی از صفحه اختلاف فاز بوجود خواهد آمد. اگر این اختلاف فاز  $\frac{\pi}{2}$  باشد به آن صفحه تیغه ربع موج می‌گویند و اگر اختلاف فاز  $\pi$  باشد به آن تیغه نیم موج می‌گویند برای مثال اگر از شیشه به عنوان ماده سازنده تیغه ربع موج استفاده شود چون  $n_e - n_o$  برای شیشه  $0.0056$  است، ضخامت تیغه باید حدود  $16 \mu m$  باشد. در این تیغه‌ها جهتی که تغییر فاز صورت

می گیرد به عنوان محور مرجع تیغه های ربع موج و نیمه موج شناخته می شود . با توجه به آنکه تیغه ربع موج موجب اختلاف فاز  $\frac{\pi}{2}$  می شود ، اغلب از آن برای تولید نور پلاریزه دایره ای از نور خطی و بالعکس استفاده می شود .

### ۳-۷-۵ آشکار سازی نور

برای تعبیر اطلاعات موجود در سیگنال نوری احتیاج به دستگاه گیرنده ای است که اولین جز آن آشکار ساز نوری است . آشکار ساز تغییرات توان نوری تابیده شده به آن را پس از دریافت ، به تغییرات جریان الکتریکی متناظر با آن تبدیل می کند . آشکار ساز نوری می باید از عدم حساسیت به تغییرات درجه حرارت ، سازگاری با ابعاد فیزیکی تا نوری ، قیمت مناسب و منطقی در ارتباط با بقیه اجزا سیستم و طول عمر زیاد برخوردار باشد.

آشکار سازهای نوری دارای انواع گوناگونی هستند که از میان آنها فرونگرهای نوری ، آشکار سازهای فیزو الکتریک و ترانز سیستورها و دیودهای نوری بیشترین کاربرد را دارند . فرونگرهای نوری از یک فتو کاتد و فرونگر الکترونی که در داخل لامپ خلاء قرار گرفته اند ، تشکیل شده اند . این نوع آشکار ساز ، دارای بهره بسیار زیاد و نویز خیلی کم است . متأسفانه کاربرد آنها در سیستم نوری به دلیل اندازه های بزرگ و ولتاژ مورد نیاز بالا، مناسب نیست . آشکار سازی های نوری فیزو الکتریک ، فوتونها را تبدیل به حرارت می کنند . جذب فوتونها منجر به تغییر درجه حرارت ماده آشکار ساز می شود و در نتیجه ثابت دی الکتریک یا به عبارتی ظرفیت آن تغییر می کند . سرعت این آشکار ساز پس از تحریک ، با سرعت خنک کنندگی آن محدود می شود . استفاده اصلی این وسیله در آشکار

سازهای لیزری با سرعت زیاد است و برای سیستم‌های تار نوری مناسب نیست. در بین آشکار سازهای نوری بیشتر از دیودنوری بدلیل اندازه کوچک، ماده مناسب، حساسیت زیاد و پاسخ زمانی سریع آن، برای سیستمهای تار نوری استفاده می‌شود. دو نوع دیود نوری مورد استفاده ماده عبارتند از: آشکار ساز نوری pin و دیود نوری بهمنی یا APD<sup>7</sup>.





## بررسی ترانسهای ولتاژ نوری

### ۱-۴ مقدمه

اندازه گیری ولتاژ یک سیستم قدرت دارای اهمیت بالایی است . دانستن مقدار ولتاژ برای محاسبه مقدار توان سیستم ، حفاظت و موارد دیگر لازم است . در حال حاضر در شبکه های قدرت اندازه گیری ولتاژ توسط ترانسفورماتور ولتاژ القایی یا خازنی صورت می گیرد . در چند سال اخیر ترانسفورماتورهای ولتاژ نوری در موارد زیادی جایگزین ترانسفورماتورهای معمولی شده است . برای اندازه گیری ولتاژ به کمک المانهای نوری ، می توان از دو اثر کر و پاکلز بهره برد . همانطور که مشاهده شد اثر کر با مجذور میدان الکتریکی و اثر پاکلز با توان اول میدان رابطه دارد . این تفاوت باعث شده که در ساخت ترانسفورماتور ولتاژ نوری بیشتر از اثر پاکلز استفاده شود . در ادامه هر دو این اثرها را به طور کاملتر بررسی کرده و مشخصات ترانسفورماتور ولتاژی که بر اساس هر یک از این اثرها ساخته می شود بدست آورده و با یکدیگر مقایسه می شوند . همچنین مشخصات و کارایی این ترانسفورماتورها بیان می شود . ( در اینجا از OPT به جای ترانسفورماتور ولتاژ نوری استفاده می شود ) .

### ۲-۴ OPT براساس اثر کر

مطابق اثر کر، اگر یک پرتو نور خطی به ماده ای که اثر کر دارد و در یک میدان الکتریکی قرار

گرفته است بتابد ، تاخیر فاز بین پرتو ورودی و خروجی ایجاد می شود که برابر است با :

$$\theta_K = 2\pi KL \frac{v^2}{d^2} \quad (1-4)$$

که در این رابطه ،  $v$  ولتاژ اعمال شده ،  $d$  فاصله بین دو الکترود تولید کننده میدان ،  $L$  طول

مسیر نور در ماده کر و  $K$  ضریب کر است . در مورد اثر کر ، میدان الکتریکی باید بر جهت انتشار

عمود باشد. حال اگر بتوان به طریقی مقدار  $\theta_K$  را اندازه گرفت، در آن صورت ولتاژ اعمال شده به ماده کر مشخص می شود. برای بدست آوردن  $\theta_K$  سیستم مدولاسیون شدت نور انتخاب می گردد. برای بدست آوردن رابطه تئوری بین شدت نور خروجی از سیستم کر و زاویه  $\theta_K$ ، روش مولر بکار گرفته می شود. سیستم کری که در اینجا استفاده می شود متشکل از دو قطبشگر و یک سلول کر ( ماده ای که از خود اثر کر نشان می دهد ) است. اگر زاویه محور قطبشگر اول نسبت به جهت انتشار نور<sup>۰</sup> ۱۳۵ و زاویه قطبشگر دوم یا آنالیز کننده<sup>۰</sup> ۴۵ باشد (اختلاف زاویه بین محور انتقالشان<sup>۰</sup> ۹۰ می شود) بردار پرتو نور خروجی با توجه به محاسبات ماتریسی مولر که در ضمیمه توضیح داده شده است برابر است با :

$$\Lambda_o = M_p(135)M_kM_p(45)\Lambda_i \quad (۲-۴)$$

که  $\Lambda_i$  برابر نور غیر پلاریزه ورودی است که همراه باماتریسهای قطبشگر و کر در ضمیمه دو

معرفی شده اند. با انجام محاسبات رابطه ۲-۴ بردار نور خروجی از سیستم کر برابر است با :

$$\Lambda_o = 0.5 \begin{bmatrix} \sin^2\left(\frac{\theta_k}{2}\right) \\ 0 \\ \sin^2\left(\frac{\theta_k}{2}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۳-۴)$$

بنابراین شدت نور خروجی از قطبشگر دوم برابر می شود با :

$$P = P_{in} \sin^2\left(\frac{\theta_k}{2}\right) \quad (۴-۴)$$

که  $P_{in}$  شدت نور ورودی یا ماکزیمم شدت نور است. اگر  $\theta_k$  را از معادله ۱-۴ در معادله ۴-۴

جایگذاری کنیم داریم :

$$P = P_{in} \sin^2\left(\frac{\pi KLV^2}{d^2}\right) \quad (۵-۴)$$

این معادله را می توان به صورت زیر هم نوشت :

$$P = P_{in} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{v}{v_m}\right)^2\right) \quad (۶-۴)$$

که :

$$v_m = \frac{d}{(2KL)^{\frac{1}{2}}} \quad (۷-۴)$$

$v_m$  ضریب سلول کر نامیده می شود که به ضریب کر و ابعاد هندسی سلول بستگی دارد . با توجه به رابطه ( ۷-۴ ) ، مشاهده می شود که شدت نور خروجی با ولتاژ رابطه غیر خطی دارد . در شکل (۴-۱ الف) رابطه  $P$  بر حسب ولتاژ برای یک سلول کر که از ماده نیتروبنزن با طول  $30^{mm}$  و پهنای  $10^{mm}$  ساخته شده است ، نشان داده شده است . از این شکل هم غیر خطی بودن خروجی نسبت به ولتاژ اعمال شده کاملاً مشخص است . به علاوه چون ثابت کر نیتروبنزن خیلی کوچک است ( به طور کلی ثابت کر اکثر مواد خیلی کوچک است ) ، در ولتاژهای پایین شدت نور خروجی در حد صفر است . بنابراین استفاده اثر کر برای ساخت OPT چندان مناسب نیست .

اگر در آرایش سیستم کر اصلاحاتی صورت گیرد و یک تیغه ربع موج در یک طرف سلول کر با زاویه های  $90^\circ$  درجه قرار داده شود ، شدت نور خروجی با  $\theta_k$  رابطه ای تقریباً خطی پیدا می کند که به صورت زیر است :

$$\frac{2\rho}{\rho_{in}} = 1 + \theta_k = 1 + 2\pi KL \frac{v^2}{d^2} \quad (۸-۴)$$

اما باز هم شدت نور با ولتاژ رابطه غیر خطی دارد . در شکل (۴-۱ ب) ، رابطه  $P$  در سیستم اصلاح شده بر حسب ولتاژ رسم شده است . از شکل مشخص می شود که سیستم کر کاملاً غیر خطی است و حتی در ولتاژهای کم ، توان خروجی از سیستم ، حالت تناوبی به خود می گیرد که در اینصورت تشخیص کار سختی است .

أشكل (۱-۴) : توان خروجی از یک سیستم اصلاح شده و سیستم اصلاح نشده بر حسب ولتاژ

#### ۳-۴ OPT بر اساس اثر پاکلز

همانطور که دیده شده اثر کر با ولتاژ رابطه غیر خطی دارد و نیز ثابت کر اکثر مواد خیلی کوچک است که باعث می شود در ولتاژهای کم دقت OPT افت کند و با توجه به این مشکلات استفاده از اثر پاکلز مناسب است زیرا این اثر با توان اول ولتاژ رابطه دارد . در حال حاضر ، اکثر OPTها بر اساس اثر پاکلز طراحی می شوند . در ادامه این بخش ، این نوع OPT به طور کامل بررسی می شود .

#### ۳-۴-۱ اصول کار OPT

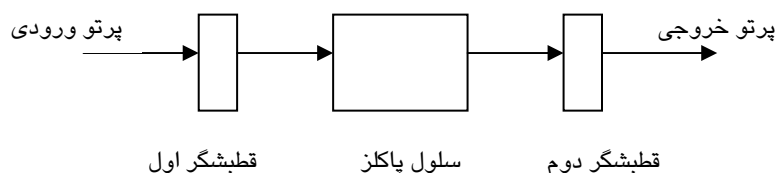
اساس کار تقریباً تمامی OPT های موجود بر اثر پاکلز بنا نهاده شده است که در اینجا شرح داده می شود . مطابق اثر پاکلز ، اگر یک ماده در میدان الکتریکی قرار بگیرد پدیده دو شکستی در آن ظاهر می شود . در اثر ایجاد پدیده دو شکستی ، نور ورودی به دو پرتو نور خطی عمود بر هم تبدیل می شود که دارای سرعتهای متفاوت هستند . بدلیل اختلاف سرعت بین دو پرتو خروجی ، اختلاف فاز بین آنها بوجود می آید که مطابق رابطه زیر با میدان الکتریکی و در نتیجه ولتاژ رابطه مستقیم دارد :

$$\theta_p = \frac{\pi \nu}{\nu_{\frac{\lambda}{2}}} = 2\pi n^3 r \frac{\nu}{\lambda} \quad (۹-۴)$$

که  $n$  ضریب شکست ماده،  $r$  ثابت پاکلز،  $\lambda$  طول موج نور و  $\nu$  ولتاژ تولید کننده میدان الکتریکی و  $\nu_{\frac{\lambda}{2}}$  ولتاژ نیم موج است. در اینجا فرض شده است که میدان توسط دو الکتروود تخت ایجاد می شود و میدان در راستای مسیر انتشار نور است. اگر میدان در راستای مسیر نور نباشد مقدار  $\theta_p$  به طول سلول وابسته می شود. حال اگر بتوان این اختلاف فاز ایجاد شده را به طریقی اندازه گرفت ولتاژ اعمال شده به الکتروودها براحتی محاسبه می شود. برای انجام این کار می توان از سیستم مدولاسیون شدت نور بهره برد.

#### ۲-۳-۴ سیستم مدولاسیون شدت نور در OPT

یکی از روشهای متداول برای بدست آوردن اختلاف فاز ایجاد شده توسط اثر پاکلز استفاده از سیستم مدولاسیون شدت نور است. این سیستم شدت نور خروجی از سلول پاکلز را به اختلاف فاز ایجاد شده ربط میدهد و سپس با پردازش شدت نور خروجی از سیستم، ولتاژ معین می شود. در شکل (۲-۴) آرایش یک OPT که بر اساس سیستم مدولاسیون شدت نور عمل می کند، نشان داده شده است.



شکل (۲-۴): سیستم اصلاح نشده پاکلز

قطبشگر اول نور ورودی را به نور خطی تبدیل می کند و سپس وارد سلول پاکلز می شود و پس از خروج از آن وارد قطبشگر دوم شده تا تغییرات ایجاد شده در آن نمایان شود. اگر زاویه قطبشگر اول ۴۵ درجه و زاویه قطبشگر دوم ۱۳۵ درجه باشد از روش مولر داریم:

$$\Lambda_o = M_o(135)M_{pk}M_p(45)\Lambda_i \quad (10-4)$$

که  $M_{pk}$  ماتریس معرف اثر پاکلز است، که در ضمیمه بررسی شده است. با انجام محاسبات

این رابطه، شدت نور خروجی برابر می شود با:

$$\rho = \rho_{in} \sin^2\left(\frac{\theta_p}{2}\right) \quad (11-4)$$

با جایگذاری  $\theta_p$  در این معادله داریم:

$$\rho = \rho_{in} \sin^2\left(\pi n^3 r \frac{v}{d}\right) = \rho_{in} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{v}{v_{\frac{\lambda}{2}}}\right) \quad (12-4)$$

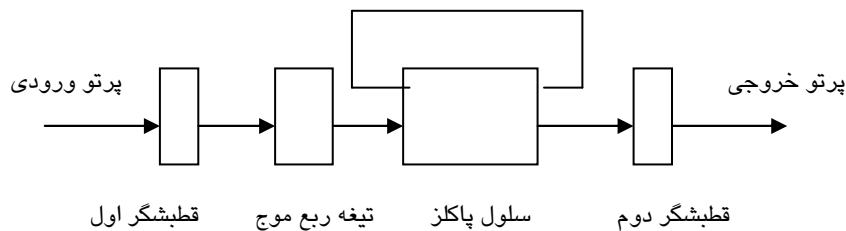
اگر چه زاویه پاکلز با توان اول میدان رابطه دارد، ولی شدت نور خروجی از این سیستم مدولاسیون شدت نور، رابطه ای خطی با ولتاژ ندارد به همین دلیل در این سیستم تغییری داده شده است که باعث می شود شدت نور با ولتاژ رابطه خطی برقرار کند. این تغییر عبارت است از اضافه کردن یک تیغه ربع موج قبل یا بعد از سلول پاکلز. آرایش یک سیستم اصلاح شده که در آن تیغه ربع موج قبل از سلول پاکلز قرار گرفته است، در شکل (۳-۴) رسم شده است. تیغه ربع موج، نور خطی ورودی به آن را به نور دایره ای تبدیل می کند. این نور پس از خروج از تیغه ربع موج، وارد سلول پاکلز می شود و به صورت نور بیضوی در می آید. میزان بیضوی شدن نور دایره ای رابطه مستقیمی با ولتاژ دارد. برای این آرایش بردار نور خروجی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Lambda_o = M_p(135)M_{pk}M_{\frac{\lambda}{4}}(90)M_p(45)\Lambda_i \quad (13-4)$$

که  $M_{\lambda/4}$  ماتریس تیغه ربع موج است که در ضمیمه معرفی شده است. در این آرایش زاویه محور

تیغه صفحه ربع موج با مسیر نور  $90^\circ$  است. شدت نور خروجی از سیستم اصلاح شده برابر است با:

$$\rho = 0.5 \rho_{in} (1 + \sin(\theta_p)) \cong 0.5 \rho_{in} (1 + \theta_p) = 0.5 \rho_{in} \left(1 + \frac{\pi v}{\lambda/2}\right) \quad (4-14)$$



شکل (۴-۳): سیستم اصلاح شده پاکلز

در آرایش اصلاح شده دوم، تیغه ربع موج بعد از سلول پاکلز قرار داده می شود. زاویه های

محور تیغه ربع موج و قطبشگرها مانند آرایش اول است. در این مورد نور خروجی از سلول پاکلز وارد تیغه می شود و اختلاف فاز ایجاد شده توسط اثر پاکلز به اندازه  $\frac{\pi}{2}$  افزایش می یابد. بردار نور خروجی

از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Lambda_o = M_p(135)M_{\lambda/4}(90)M_{pk}M_p(45)\Lambda_i \quad (4-15)$$

با انجام محاسبات این رابطه، برای شدت نور خروجی از قطبشگر دوم همان رابطه ۴-۱۴ دست

می آید که نشان می دهد این دو آرایش از لحاظ شدت نور خروجی با هم یکسان هستند بنابراین

مشاهده می شود که با تغییر آرایش سیستم پاکلز، شدت نور خروجی رابطه ای خطی با ولتاژ پیدا می

کند. (رابطه ۴-۱۴)

### ۳-۳-۴ مدار پردازش سیگنال در OPT

شدت نور خروجی از سیستم پاکلز در قسمت قبل بدست آمد ، این سیگنال سپس وارد قسمت آشکار ساز نوری می شود و به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود . حال باید با پردازش این سیگنال مقدار  $\theta_p$  را بدست آورد . در اینجا فقط نتایج روشهای پردازش این سیگنال برای ترانسفورماتور ولتاژ بیان خواهد شد .

برای OPT های اثر کر، ولتاژ خروجی مدار پردازش سیگنال برای آرایش اصلاح نشده آن برابر است با :

$$v_{out} = \cos(\theta_k) \quad (۴-۱۶)$$

و برای آرایش اصلاح شده برابر می شود با :

$$v_{out} = \sin(\theta_k) \quad (۴-۱۷)$$

همچنین برای OPT های اثر پاکلز همین رابطه ها صادق است و فقط باید  $\theta_k$  با  $\theta_p$  جایگزین شود .

#### ۴-۲-۴ مواد سازنده سلول پاکلز

بلور های زیادی وجود دارند که اثر الکترو نوری پاکلز از خود نشان می دهند که میان آنها می توان از  $LiNbO_3$ ،  $BGO$ ،  $LiTaO_3$ ،  $Bi_4Ge_3O_{12}$  و  $BSO$  نام برد . از میان این مواد ، بیشتر از  $BGO$  و  $BSO$  برای ساخت سلول پاکلز استفاده می شود . در این میان ،  $BGO$  بدلائل زیر بر مواد دیگر ارجحیت دارد :

۱- در مقایسه با  $LiNbO_3$  و  $LiTaO_3$  ، وابستگی حرارتی اثر پاکلز در  $BGO$  کوچک است .

۲- چون  $BGO$  هیچ توان گردان نوری ندارد ، می توان ضخامت سلول را زیاد گرفت تا تحمل عایقی آن زیاد شود .



۳- ثابت دی الکتریک  $BGO$  حدود ۱۶ است و مقاومت ویژه آن هم حدود  $10^{15} \Omega/ Cm$  است. بنابراین ، با توجه به کوچک بودن ثابت دی الکتریک و بزرگ بودن مقاومت ویژه  $BGO$  ، توزیع ولتاژ اعمال شده بندرت توسط سنسور آشفته می شود .

بعد از  $BGO$  ، استفاده از  $BSO$  رایج تر است . یکی از تفاوت‌های  $BSO$  نسبت به  $BGO$  داشتن توان گردان نوری است که رابطه اختلاف فاز ایجاد شده توسط سلول پاکلز را پیچیده تر می کند . در صورت استفاده از این ماده در سلول پاکلز هر دو پدیده دو شکستی و چرخش صفحه پلاریزاسیون نور ورودی ، بطور همزمان اتفاق می افتد .

بنابراین اگر سلول پاکلز از  $BSO$  ساخته شده باشد و از این سلول در سیستم مدولاسیون شدت نور با آرایش اصلاح شده استفاده شود ، شدت نور خروجی از سنسور با رابطه های زیر بیان می شود :

$$P = P_m (1 + m) \quad (۱۸-۴)$$

$$m = \pi \frac{v}{v_{\lambda/2}} f(v) \quad (۱۹-۴)$$

$$f(v) = \frac{\sin[g(v)]}{g(v)} \quad (۲۰-۴)$$

$$g(v) = \sqrt{\left(\pi \frac{V}{V_{\lambda/2}}\right)^2 + (2\varphi d)^2} \quad (۲۱-۴)$$

ولتاژ نیم موج است که برابر با ۶۸۰۰ ولت است و  $\varphi$  توان گردان نوری و  $d$  عرض سلول پاکلز  $V_{\lambda/2}$

است . در ضمن به  $m$  ضریب مدولاسیون گفته می شود که این اصطلاح در مورد سایر OPT ها هم بکار برده می شود .

#### ۴-۴ مشخصات OPT

برای پی بردن به کارایی ترانسفورماتور ولتاژ نوری ، باید مشخصات و نحوه کار آنها مشخص باشد . از جمله این مشخصات مشخصه خروجی و حرارتی آنهاست که نقش مهمی در کارایی آنها

دارند . در این بخش ، مشخصات خروجی OPT های اثر کر و پاکلز بررسی و با هم مقایسه می شوند . همچنین تاثیر حرارت را روی اثر پاکلز مشاهده کرده و راههایی برای کاهش تاثیر حرارت در بعضی موارد خاص ارایه می شود .

#### ۱-۴-۴ مشخصه خروجی OPT

مشخصه خروجی OPT ، بصورت ولتاژ خروجی مدار پردازش سیگنال برحسب ولتاژ اعمال شده بیان می شود . این مشخصه تابعی سینوسی برحسب  $\theta_k$  یا  $\theta_p$  است . در جدول (۱-۴) توابع خروجی OPT های اثر کر و پاکلز آمده است و مقادیر تقریبی هر مشخصه هم بیان شده است .

نوع OPT	آرایش اصلاح نشده	آرایش اصلاح شده
اثر کر OPT	$\cos(\theta_k)$	$\cos(\theta_k) \cong \theta_k$
اثر پاکلز OPT	$\sin(\theta_p)$	$\sin(\theta_p) \cong \theta_p$

جدول (۱-۴) : توابع معرف مشخصه خروجی OPT

داشتن مشخصه خروجی خطی از شرایط مهم برای کارایی بهتر OPT است . اگر به توابع تقریبی که در جدول ( ۱-۴ ) داده شده است توجه شود ، مشاهده می شود که تنها اثر پاکلز با آرایش اصلاح شده دارای مشخصه خطی است و در بقیه موارد مشخصه غیر خطی است . بنابراین ، اثر پاکلز با آرایش اصلاح شده بهترین نوع OPT است و در اکثر ترانسفورماتورهای ولتاژ نوری از این آرایش استفاده می شود . از این شکل مشخص است که تنها مشخصه OPT اثر پاکلز با آرایش اصلاح شده نسبتاً خطی است و در بقیه موارد ، مشخصه ها کاملاً غیر خطی است .

از ویژگیهای دیگر OPT ، محدوده دینامیکی عملکرد آنهاست که می‌توان همان محدوده خطی OPT در نظر گرفت . برای نمونه محدوده کار خطی برای OPT اثر پاکلز با آرایش اصلاح شده که در شکل ( ۴-۴ ) مشخصه آن رسم شده است ، حدود ۴۰۰۰ ولت است که می‌توان بطور تقریبی برابر با محدوده دینامیکی OPT در نظر گرفت .

مشخصه خروجی OPT به عواملی مانند ثابت کر و پاکلز که به نوع ماده بستگی دارد ، طول سلول کر و پاکلز و فاصله دو الکتروود که میدان الکتریکی را ایجاد می‌کند بستگی دارد . البته در اثر پاکلز در مد طولی آن ،  $\theta_p$  تنها با  $V_{\lambda/2}$  رابطه دارد و در نتیجه مشخصه خروجی تنها به  $V_{\lambda/2}$  وابسته می‌شود .

الف - OPT اثر پاکلز با آرایش اصلاح نشده - OPT اثر پاکلز با آرایش اصلاح شده

ج - OPT اثر کر با آرایش اصلاح نشده - OPT اثر کر با آرایش اصلاح شده

اگر ولتاژ اعمال شده به سلول پاکلز کوچکتر از  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  باشد بطوریکه شرط  $V_{\frac{\lambda}{2}} < 0.25 V_{\frac{\lambda}{2}}$  ارضا شود، آنگاه ضریب مدولاسیون با ولتاژ رابطه خطی پیدا می کند. در نتیجه هر چه  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  بزرگتر باشد رنج دینامیکی OPT بزرگتر می شود. برای مقایسه در شکل (۴-۵) مشخصه خروجی OPT برای BSO و  $LiNbO_3$  با ولتاژهای نیم موج ۶۸۰۰ ولت و ۱۱۲۰ ولت رسم شده است که صحت ادعای بالا تایید می گردد.

شکل (۴-۵): مقایسه محدوده کار خطی دو سنسور ولتاژ نوری با ولتاژ با ولتاژهای نیم موج متفاوت

#### ۴-۴-۲ مشخصه حرارتی OPT

مشخصه خروجی OPT تحت تاثیر حرارت تغییر می کند. تغییر درجه حرارت ثابت کروپاکلز یا به نوعی ولتاژ نیم موج اثر پاکلز را تحت تاثیر قرار می دهد که موجب می شود مشخصه خروجی OPT تغییر کند. اگر ضریب حرارتی  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  را  $\Delta V_{\frac{\lambda}{2}}$  فرض کنیم، رابطه  $\theta_p$  به صورت زیر در می آید:

$$\theta_p = \pi \frac{V}{V_{\frac{\lambda}{2}} (1 + \Delta V_{\frac{\lambda}{2}} \times \Delta T)} \quad (۴-۲۲)$$

برای نمونه ضریب حرارتی  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  برای  $LiTaO_3$  حدود  $10^{-5}/^{\circ}C$  است. در شکل (۴-۶) تغییرات

حرارتی ولتاژ خروجی مدار پردازشگر سیگنال برحسب درجه حرارت برای سنسور نوری ولتاژ ساخته شده از  $LiTaO_3$  رسم شده است.

شکل (۶-۶): تغییرات حرارتی یک سنسور نوری که ماده سازنده سلول سنسور  $LiTaO_3$  است.

اگر از ماده  $BSO$  بعنوان سلول پاکلز استفاده شود، بدلیل توان گردان نوری این ماده، وابستگی

حرارتی سنسور بیشتر می شود. مشخصه حرارتی این ماده را می توان بصورت تئوری از روابط (۴-۱۸) تا (۴-۲۱) بدست آورد. ضریب حرارتی  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  برای  $BSO$  حدود  $10^{-4}/^{\circ}C$  و ضریب حرارتی

توان گردان نوری آن حدود  $10^{-5}/^{\circ}C$  است.

بنابراین با فرض تغییر درجه حرارت باندازه  $\Delta T$ ، معادله (۴-۲۱) به صورت زیر در می آید:

$$g(V) = \sqrt{\left[ \frac{\pi V}{V_{\frac{\lambda}{2}}(1 + \Delta V_{\frac{\lambda}{2}} \cdot \Delta T)} \right]^2 + [2\phi(1 + \Delta\phi \cdot \Delta T)d]^2} \quad (۴-۲۳)$$

چون ضریب حرارتی طول سلول حدود  $10^{-5}$  بر درجه سانتیگراد است در محاسبات تغییر حرارتی

مشخصه خروجی OPT در نظر گرفته نمی شود.

با دقت در رابطه (۴-۲۳) مشاهده می شود که تغییرات حرارتی  $g(V)$  به ضخامت سلول وابسته

است.

در شکل (۷-۴) تغییرات ضریب مدولاسیون  $m$  بر حسب ضخامت سلول به ازای  $\Delta T = 60^\circ C$  رسم شده است. این شکل نشان می دهد که وابستگی حرارتی با تغییر ضخامت سلول تغییر می کند بطوریکه در ضخامتی حدود  $4/66$  میلیمتر حداقل است. در شکل (۸-۴) وابستگی حرارتی مشخصه خروجی OPT با ازای  $d = 2^{mm}$  و  $d = 4.7^{mm}$  رسم شده است که می توان وابستگی حرارتی را به ازای این دو ضخامت با یکدیگر مقایسه کرد. تغییرات حرارتی OPT به ازای  $4/7^{mm}$  در محدوده  $10-$  تا  $85$  درجه سانتیگراد، حدود  $\pm 0/2\%$  است که در مقایسه با سلول با  $2^{mm}$  قابل اغماض است.

شکل (۷-۴): رابطه بین تغییرات ولتاژ خروجی با دما و ضخامت سلول

شکل (۸-۴): مشخصه حرارتی سنسور ولتاژ برای دو طول مختلف

#### ۵-۴ مسئله عملی OPT

همانگونه که در بررسی مشخصه خروجی OPT مشاهده شد، برای داشتن مشخصه خطی باید ولتاژ اعمال شده به سنسور در حد چند کیلو ولت محدود باشد این ولتاژ در سلول پاکلز باید از

$V_{\frac{\lambda}{2}}$  کوچکتر باشد تا مشخصه خطی باقی بماند با توجه به آنکه اگر مواد دارای  $V_{\frac{\lambda}{2}}$  کوچک هستند ، پس نمی توان ولتاژ های بالا را مستقیماً به سلول اعمال کرد بهمین دلیل مانند ترانسفور مدهای ولتاژ خازنی ، باید از مقسم های خازنی برای کاهش ولتاژ استفاده کرد و ولتاژ را به حد چند کیلوولت رساند .

#### ۶-۴ بررسی مدار پردازش سیگنال در OCT

چون با  $\theta_f$  با جریان رابطه مسقیم دارد ، اگر جریان متغیر باشد توان ورودی به آشکار ساز یک سیگنال متغیر خواهد بود . بنابراین در خروجی آشکار ساز یک سیگنال الکتریکی متغیر داریم که برای بدست آوردن مقدار  $\theta_f$  باید این سیگنال پردازش شود . برای رسیدن به مقدار  $\theta_f$  چندین روش وجود دارد که این روش ها اساس کار مدار پردازش سیگنال هستند .

#### ۶-۴-۱ مدار پردازش سیگنال بر اساس روش AC/DC

در این روش قسمت AC سیگنال خروجی از آشکار ساز جداش ده و بر قسمت DC آن تقسیم میشود .

در سیستم مدولاسیون شدت نور ، با توجه به رابطه (۴-۲۴) ، قسمت AC سیگنال خروجی از

آشکار ساز برابر است با :

$$\left( \begin{array}{l} P_{\text{det } 1} = 0.5 P_{\text{in}} (1 - \sin 2\theta_f(t)) \\ P_{\text{det } 2} = 0.5 P_{\text{in}} (1 + \sin 2\theta_f(t)) \end{array} \right) \quad (۴-۲۴)$$

$$P_{Oac} = \pm 0.5 P_{in} \sin 2\theta_f(t) \quad (۴-۲۵)$$

اگر  $\theta_f$  را کوچک فرض کنیم داریم :

$$P_{Oac} \cong 0.5 P_{in} \theta_f(t) \quad (۲۶-۴)$$

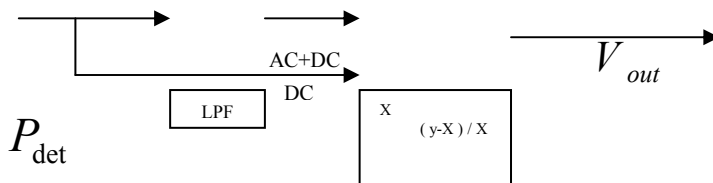
جزء DC هم برابر است با :

$$P_{Odc} = 0.5 P_{in} \quad (۲۷-۴)$$

با توجه به رابطه (۲۶-۴) مشاهده می شود که جزء AC دارای اطلاعات لازم در مورد جریان است . اما چون این رابطه با توان منبع نور ارتباط دارد و توان منبع نور مرتباً تغییر می کند ، استفاده از آن مناسب نیست . بنابراین برای رسیدن به رابطه دقیق، خروجی مدار پردازش سیگنال را با محاسبه قسمت AC سیگنال به قسمت DC آن نرمالیزه می شود . پس ولتاژ خروجی مدار پردازش سیگنال از رابطه زیر بدست می آید :

$$V_{out} = \frac{P_{Oac}}{P_{Odc}} = 2\theta_f(t) = AI(t) \quad (۲۸-۴)$$

که A ضریب ثابتی است که به آشکار ساز و مدار پردازشگر سیگنال بستگی دارد و  $I(t)$  جریانی است که اندازه گیری می شود . بنابراین مقدار  $\theta_f(t)$  مستقل از توان منبع نور ورودی است در شکل (۹-۴) بلوک دیاگرام یک مدار پردازش سیگنال که بر اساس روش AC/DC کار می کند آمده است .



شکل (۹-۴) : بلوک دیاگرام مدار پردازش سیگنال بر اساس روش AC/DC

#### ۲-۶-۴ مدار پردازش سیگنال به روش +/-

می توان با تغییر زاویه نسبی بین قطبشگر اول و دوم ، توان ورودی به آشکار ساز را تغییر داد .

اگر در سیستم مدولاسیون شدت نور به جای یک آنالیز کننده از دو آنالیز کننده که با قطبشگر اول

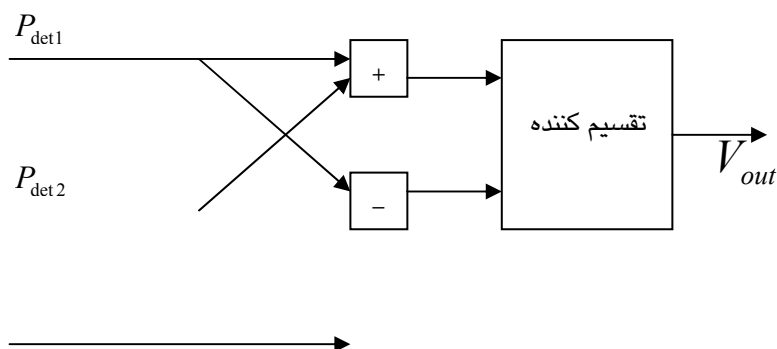


زاویه های  $+45$  و  $-45$  درجه می سازند و نیز از دو مدار آشکار ساز استفاده کنیم ، توان ورودی به آشکار سازها از دو رابطه (۴-۲۴) بدست می آیند . حال اگر نسبت تفاضل توانهای ورودی به آشکار سازها را به مجموع آنها محاسبه کنیم داریم :

$$V_{out} = \frac{P_{det1} - P_{det2}}{P_{det1} + P_{det2}} = \sin 2\theta_f(t) \cong 2\theta_f(t) = AI(t) \quad (4-29)$$

این روش را روش  $-/+$  می نامند .

در شکل (۴-۱۰) بلوک دیاگرام مدار پردازشگری که بر اساس این روش کار می کند رسم شده است . نتیجه نهایی این روش و روش  $AC/DC$  یکسان است اما سیستم مدولاسیون شدت نوری که بر اساس روش  $-/+$  طراحی می شود پیچیده تر از سیستمی است که بر اساس روش  $AC/DC$  طراحی می شود و مدار پردازشگری هم که بر اساس این روش طراحی می شود نیز پیچیده است . اما از مزایای روش  $-/+$  کاهش نویزهای مشترک بین  $P_{det1}$  و  $P_{det2}$  است .



شکل (۴-۱۰) : بلوک دیاگرام مدار پردازش سیگنال بر اساس روش  $-/+$

#### ۴-۶-۳ مدار پردازش سیگنال با استفاده از متوسط شدت نور

روش دیگری که برای طراحی مدار پردازش سیگنال کار برد دارد ، استفاده از رابطه زیر برای

بدست آوردن ولتاژ خروجی است :

$$V_{out} = \frac{P_{det1} - \overline{P_{det1}}}{P_{det1}} - \frac{P_{det2} - \overline{P_{det2}}}{P_{det2}} \quad (۳۰-۴)$$

که  $\overline{P_{det1}}$  و  $\overline{P_{det2}}$  نشان دهنده مقادیر متوسط شدت نور ورودی به آشکار سازها است. اگر فرض

کنیم که  $\theta_f$  خیلی کوچک باشد، آنگاه رابطه های (۴-۲۴) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P_{det1} \cong 0.5P_{in}(1 - 2\theta_f(t)) \quad (۳۱-۴)$$

$$P_{det2} \cong 0.5P_{in}(1 + 2\theta_f(t)) \quad (۳۲-۴)$$

چون  $\theta_f(t)$  با جریان رابطه مستقیم دارد، پس:

$$P_{det1} \cong 0.5P_{in}(1 - KI_o \sin \omega t) \quad (۳۳-۴)$$

$$P_{det2} \cong 0.5P_{in}(1 + KI_o \sin \omega t) \quad (۳۴-۴)$$

در این دو رابطه  $K$  ضریب ثابتی است که بستگی به نوع ترانس دارد و  $I_o$  دامنه جریان هادی و  $\omega$

فرکانس زاویه ای جریان است. با توجه به این روابط،  $\overline{P_{det1}}$  و  $\overline{P_{det2}}$  برابر  $0.5P_{in}$  است. بنابراین رابطه (۴-

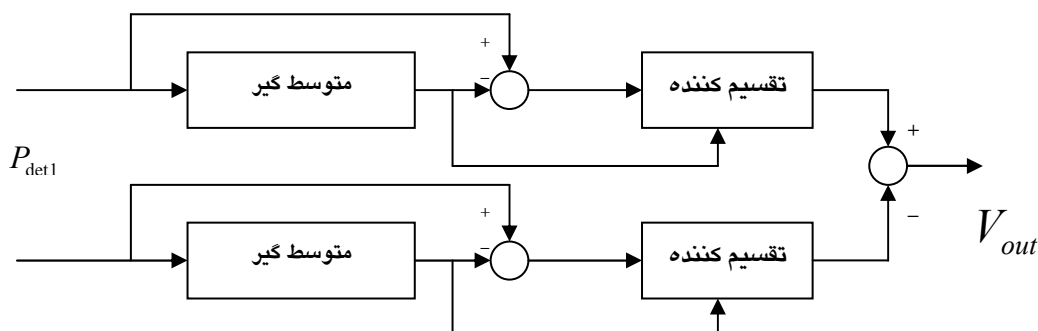
۳۰) بصورت زیر ساده می شود:

$$V_{out} = 2KI_o \sin \omega t \quad (۳۵-۴)$$

مشاهده می شود که نتیجه نهایی این روش با روش های قبل یکسانی است و ولتاژ خروجی مدار

پردازشگر سیگنال با جریان متناسب است. از مزیت های این روش، می توان به حذف تغییرات سریعی که در

شدت منبع نور ورودی اتفاق می افتد اشاره کرده.



شکل (۴-۱۱) : بلوک دیاگرام مدار پردازش سیگنال بر اساس روش استفاده از متوسط شدت نور

$P_{\text{det } 2}$

## فصل پنجم

### ۵-۱ مقدمه

صنعت بهره‌برداری چند سال است که سنسورهای نوری را برای اندازه‌گیری جریان و ولتاژ به کار می‌برد. این دستگاه‌های نوری اقبال افزاینده‌ای پیدا کرده‌اند، به ویژه در کاربردهایی که دقت اندازه‌گیری آنها در طول یک رنج دینامیکی گسترده‌تر، امنیت بهبود یافته ثبت شده به طور ویژه‌ای گیرا است. مبدل‌های جریان نوری (CTها) و مبدل‌های ولتاژ (VTها) و ابزار متصل شده در حال حاضر به طور تجاری برای بیش از یک دهه برای جایگزین شدن با CTها و VTهای معمولی و ترانسفورماتورهای ولتاژ با کوپلاژ خازنی موجود است. مقبولیتی که در پس این کاربردهای ویژه است (که شامل مشکلات تکنیکی که برای واحدهای متداول غلبه شدن بر آن سخت است می‌شود) در حال پیشرفت هستند.

همچنین فواید یک سیستم مرتبه گسترده‌تر را با توجه به درگیر بودن با هزینه‌ها (و صرفه‌جویی هزینه‌ها)ی انتخاب‌های تجهیزات در بر می‌گیرد .

واژه‌های مانند فارادی یک محل دور از دسترس و اساسی در تاریخچه فیزیک دارند . چنانچه ممکن است شما انتظار داشته باشید به کار گرفتن نظریاتی چون اثر فارادی و اثر پاکلز برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی عملاً جدید نیست . همزمان با اینکه تجربیات صنعت در مورد تکنولوژی نوری پیشرفت کرده سیستم‌های نوری کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده‌اند . دیگر فقط یک راه برای حل مسائل خاص نیست ، مهندسين بهره‌وری امروزه سنسورهای نوری را برای صرفه‌جویی هزینه‌ها در همه جابه کار می‌برند. کارآیی بی‌نظیر آنها قیمتی را می‌آورد که قیمت خرید اولیه بالاتر را جبران می‌کند .

این مبحث برآورد هزینه تلاش می‌کند که نه تنها هزینه‌های سرمایه و هزینه‌های نصب را در نظر بگیرد بلکه هزینه‌های چرخه زندگی و تخمین بهبودهای کارآیی عملکرد را کامل کند . ما از مثال‌ها استفاده می‌کنیم تا نکات عمده را مجسم کنیم ، اما در ذهن داشته باشید که تخمین بهبودهای کارآیی عملکرد دارای کاربردهای خاص خیلی زیادی است ، که در نظر هر مشاهده‌گر حقیقتاً جالب است .

## ۵-۲- مزایا

سنسورهای نوری مزایای منحصر به فرد چندی نسبت به CTها و VTهای متداول دارد :

دقت : سنسورهای نوری بیشترین دقت و پایداری ممکن را نسبت به زمان و دما دارا می‌باشند .  
 کارآیی اندازه‌گیری آنها از کلاس IEC 0/2s و کلاس IEEE 0/3 تجاوز نمی‌کند، در حالیکه دقت‌های حفاظتی IEC 3p یا 5p و IEEE 10٪ همچنین به سادگی برآورده می‌شود .

**محدوده دینامیکی :** دقت‌های مشخص شده در بالا در محدوده وسیعی از جریان‌ها و ولتاژها حفظ می‌شوند. دقت‌های اندازه‌گیری تا جریان‌های زیر  $1^A$  با استفاده از یک سنسور فیبر نوری موجود هستند، در حالیکه ابزار مشابهی می‌تواند دقت‌های حفاظتی را در جریان‌های اتصال کوتاه تا بالای  $170^{KA}$  فراهم کند. VT‌های نوری می‌توانند اندازه‌گیری ولتاژ را از ۲٪ تا ۲۰۰٪ ولتاژ نامی انجام دهند.

این ترکیب دقت در طول محدوده دینامیکی اجازه می‌دهد یک سنسور تنها برای هر دو منظور کاربردهای اندازه‌گیری و حفاظت به کار رود. خروجی‌های جدا از هم یا (اجزاء الکترونیکی جدا از هم جایی که دسترسی به یک سیستم رایج به وسیله چندین استفاده کننده قابل قبول نمی‌باشد) به هر کدام از این گروه‌های استفاده کننده اجازه می‌دهد تا با سیستم‌های خود به طور مستقل کار کنند. این دقت در طول محدوده دینامیکی که علت عمومیت سنسورهای نوری برای استفاده توسط تولید کننده قدرت مستقل ( $IPP^8$ ) است که باید خروجی کامل ژنراتور بر روی شبکه انتقال هنگامی که IPP در حال تولید است، و همچنین جریان‌های خیلی کوچک وقتی که IPP قدرتی برای سرویس پست را تولید می‌کند، را هر دو با هم اندازه‌گیری کند، دقت لازم را دارا است.

**پهنای باند :** پهنای باند خروجی از یک دستگاه نوری فقط بوسیله اجزاء الکترونیک آنالوگ نوعاً از  $45^{HZ}$  تا  $6^{KHZ}$  محدود می‌شود. خروجی CT دیجیتال اندازه‌گیری را از رنج  $50^{KHZ}$  تا  $75^{KHZ}$  اجازه می‌دهد، و فرکانس پائین تا DC برای یک CT فیبر نوری.

اندازه، وزن و تعداد دستگاه‌ها : سنسورهای نوری معمولی از عایق‌های هسته تو خالی مرکب استفاده می‌کنند : خواه واحدهای جدا از هم خواه یک CT در بالا و VT‌های داخل . یک CT و VT متصل شده ، تنها می‌تواند جایگزین تعدادی برابر با چهار واحد متداول جدا از هم شود- یک CT اندازه‌گیری ، یک VT اندازه‌گیری ، یک CT حفاظتی ، و یک VT حفاظتی. یک دستگاه نوری وزنش نوعاً ۱۰٪ وزن یک واحد با روغن پر شده متداول می‌باشد .

واحدهای با وزن کمتر تعدادی مزیت واقعی برای بهره‌برداری دارند، خصوصاً در طول گسترش دادن‌های پست که ابزار متداول دیگر نمی‌توانند شرایط سخت و افزایشده مربوط به ارتعاش را تحمل کنند .

امنیت درونی ، طراحی مساعد محیطی : چون وسایل نوری شامل روغن معدنی یا عایق‌های سلولزی نیستند ، ریسک خطای فاجعه‌آمیز و خطر برای تجهیزات مجاور و پرسنل حذف شده است . مثلاً ، یک سنسور ولتاژ توزیع شده همراه با الکترودهای با فاصله از هم را به کار می‌برند . پایه‌ها به سادگی با گاز نیتروژن پر شده‌اند و نسبت به گاز سولفور هگزافلوراید ( $SF_6$ ) مشکل‌ساز بهتر می‌باشد . چون واحدها شامل وسایل راکتیو نیستند، ریسک فرورزونانس هم حذف می‌شود ، و چون سیم‌پیچی CT وجود ندارد، واحد از خطرهای مربوط به اتصال باز سیم‌پیچی ثانویه دور است .

تعمیر و نگهداری : سنسورهای نوری غیرفعال (بر خلاف مدل‌های جدیدی سنسورهای فعال) شامل هیچ وسیله الکترونیکی در خط ولتاژ نیستند . بدون روغن‌های عایقی یا کاغذها برای ایزوله کردن ، نیاز به نگهداری به طور عمده‌ای کاهش می‌یابند . به علاوه، قطعات الکترونیکی سنسور جریان و روش‌های کنترل نرم‌افزاری ، هر موقعیتی را مانند زمانی که یک مولفه مورد اندازه‌گیری، دماها، یا

پارامتر نوری به محدوده بالاتر از خطای از پیش تنظیم شده می‌رود را تشخیص می‌دهد. سرویس خواهی کم قطعات الکترونیکی، به طور عمده‌ای اطمینان سیستم را اضافه می‌کند.

### ۵-۳- تحلیل نوع تجاری

هزینه سرمایه حقیقتاً تنها یک بخشی از هزینه‌های کلی برای هر تجهیز پستی است. ترانسفورماتورهای نوری همچنین کارآیی کاهش دادن هزینه‌های ابتدایی پست را دارند، به طور متقابل درآمد را افزایش می‌دهند، و هزینه عمومی مالکیت را در طول چرخه کامل اعم از طراحی پست، تدارکات، ساخت، نصب، و در طول سال‌های کارکرد تا آخر حیات پست را کاهش می‌دهد. با این وجود، در شرایط تجاری امروزه، ملاحظات اولیه، هزینه‌های نصب را باقی می‌گذارد.

### ۵-۳-۱ هزینه‌های سرمایه پست و هزینه‌های ساخت

مزایای توضیح داده شده سیستم نوری، مستقیماً به هزینه‌های کاهش یافته سرمایه پست منجر می‌شود، دقت بالا در طول محدوده دینامیکی وسیع، و وسایل متصل شده (VTها و CTهای مناسب برای اندازه‌گیری و حفاظت) منجر می‌شود به:

- واحدهای مورد نیاز کمتر
- هزینه‌های کمتر مهندسی و طراحی
- کار ساختمانی و ساختارهای پشتیبانی کمتر
- کانال کشی برای کابل کمتر
- کاهش نیازهای غیر منقول (زمین و غیره)
- انعطاف بازگشت به تناسب بدون نگرانی در مورد پایداری در برابر لرزش



- حذف اندازه‌گیری سطح پائین

این مزایا همچنین به هزینه ساخت کاهش یافته منجر می‌شود. وزن کمتر و ایزوله‌شدن از اثر اتصال کوتاه منجر می‌شود به :

- کم کردن هزینه‌های اجرای فوندانسیون
- تجهیزات مورد نیاز کمتر برای نصب
- هزینه‌های حمل و نقل و جابجایی کمتر

به عنوان مثال ، سنسورهای نوری آزمایشی را Nxt phase Hydro Quebec برای مقایسه کردن کارآیی آنها و هزینه‌ها با دستگاه‌های متداول نصب کرد . سیستم معمول شامل CTها و VTهای پر شده از روغن جدا از هم برای حفاظت ، یک CT پر شده از روغن متصل با VT برای اندازه‌گیری ، و اندازه‌گیری طرف ولتاژ پائین بر روی یک ترانسفورماتور افزاینده برای اندازه‌گیری بار گرفته شده از پست است . سیستم نوری از یک CT و VT متصل شده به هم با خروجی‌هایی برای هر دو منظور اندازه‌گیری و حفاظت تشکیل شده است .

در زیر مقایسه‌ای در هزینه نصب یک سیستم  $138^{KV}$  با ترانسفورماتورهای نوری و سیستم‌های معمولی ارائه شده است :

این مثال ، تقاضا ، برای سیستم‌های نوری در کاربردهای IPP جایی که اندازه‌گیری سطح پائین برای اندازه‌گیری گرفتن ترسیم کارکرد پست لازم است پر نورتر می‌شود . مقایسه‌های هزینه با واحدهای نوری در کلاس‌های ولتاژ بالاتر مساعدتر هستند ، از این رو منحنی هزینه برای واحدهای نوری در مقایسه با واحدهای سیم‌پیچی شده متداول پر شده از روغن و پر شده از  $SF_6$  خیلی صاف است . اگر

معلوم کردن کمیت مشکل است ، شرکت برق باید همچنین در نظر بگیرد که تعداد کاهش یافته واحدها به صرفه جویی مازاد در هزینه واقعی پست و کانال کشی برای کابل منتهی می شود .

بعضی از مقایسه ها بین واحدهای متداول و نوری فقط خود قیمت دستگاهها را بررسی می کنند . احتیاط را در این سنجش ها و انتخابها به کار ببرید . مقایسه های مستقیم باید واحدهای با کارایی و ریسک های مشابه را در نظر بگیرند . از آنجایی که CT های نوری هیچگونه ریسک خطای انفجاری ندارند ، مناسب تر است که آنها را با CT های متداول پر شده از گاز SF<sub>6</sub> مقایسه کنیم . به طور مشابه VT های نوری مزیت های کارکرد اصولی و قانع کننده ای با دقت خوب در مقابل تغییرات دما در مقایسه با واحدهای متداول دارند . کارایی آنها خیلی فراتر از CCVT ها یا حتی VT های سیم پیچی شده است . یک مقایسه کوتاه بین یک سیستم نوری و VT پر شده از روغن ۲۳۰<sup>KV</sup> متصل شده به CT نشان می دهد که سیستم های نوری با کارایی مشابه صرفه جویی های قانع کننده ای را پیشنهاد می کنند .

### ۵-۳-۲ بازده کارایی عملکرد

مزایای سیستم نوری همچنین به بازده های کارایی عملکرد منجر می شود . دقت در طول یک

رنج دینامیکی گسترده منجر شود به :

- دریافت درآمد بیشتر
- بارگیری خط بهبود یافته
- بی نیازی از تخمین تلفات ترانسفورماتور

هزینه سرمایه	قیمت واحد به دلار		تعداد		مبلغ کل به دلار	
	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری
سمت فشارضعیف						

ترانسهای ولتاژ و جریان	۳۵۰۰		۶		۲۱۰۰۰	
اندازه گیری	۲۵۰۰		۱		۲۵۰۰	
تابلو	۱۲۰۰۰		۱		۱۲۰۰۰	
مجموع فشار ضعیف					۳۵۵۰۰	۰
سمت فشار قوی						
ترانس ولتاژ حفاظتی	۸۵۰۰		۳		۲۵۵۰۰	
ترانس جریان حفاظتی	۹۰۰۰		۳		۲۷۰۰۰	
ترانس ولتاژ و جریان اندازه گیری با هم	۱۶۵۰۰		۳		۴۹۵۰۰	
ترانس ولتاژ و جریان اندازه گیری و حفاظتی با هم		۱۰۸۰۰۰		۱		۱۰۸۰۰۰
فوندانسیون	۶۰۰۰	۴۰۰۰	۹	۳	۵۴۰۰۰	۱۲۰۰۰
آهن	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۹	۳	۱۳۵۰۰	۴۵۰۰
اندازه گیری	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱	۱	۲۵۰۰	۲۵۰۰
مجموع فشار قوی					۱۷۲۰۰۰	۱۲۷۰۰۰

هزینه نصب	قیمت واحد به دلار		تعداد		مبلغ کل به دلار	
	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری
سمت فشار ضعیف						
زمان نصب (نفر-ساعت)	۲۴					
دستمزد هر ساعت	۱۰۰					
دستمزد نصب فشار ضعیف	۲۴۰۰	۰	۶		۱۴۴۰۰	۰
سمت فشار قوی						
زمان نصب (نفر-ساعت)	۵۰	۵۵				
دستمزد هر ساعت	۱۰۰	۱۰۰				
دستمزد نصب فشار قوی	۵۰۰۰	۵۵۰۰	۹	۳	۴۵۰۰۰	۱۶۵۰۰

مجموع هزینه نصب					۲۶۶۹۰۰	۱۴۳۵۰۰
-----------------	--	--	--	--	--------	--------

جدول ۱: مقایسه هزینه نصب شده بین واحدهای  $138^{KV}$  اندازه گیری و حفاظت نوری و متداول

هزینه سرمایه	قیمت واحد به دلار		تعداد		مبلغ کل به دلار	
	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری
ترانسهای ولتاژ و جریان	۳۵۰۰		۶		۲۱۰۰۰	
اندازه گیری	۲۵۰۰		۱		۲۵۰۰	

تابلو	۱۲۰۰۰		۱		۱۲۰۰۰	
مجموع فشار ضعیف					۳۵۵۰۰	۰
سمت فشار قوی						
ترانس ولتاژ و جریان اندازه گیری با هم-پرسیده روغن	۳۲۰۰۰		۳		۹۶۰۰۰	
ترانس ولتاژ و جریان اندازه گیری و حفاظتی با هم		۱۲۰۰۰۰		۱		۱۲۰۰۰۰
اندازه گیری	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۱	۱	۲۵۰۰	۲۵۰۰
مجموع فشار قوی					۹۸۵۰۰	۱۲۲۵۰۰

هزینه نصب	قیمت واحد به دلار		تعداد		مبلغ کل به دلار	
	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری	ترانس معمولی	ترانس نوری
سمت فشار ضعیف						
زمان نصب (نفر-ساعت)	۲۴					
دستمزد هر ساعت	۱۰۰					
دستمزد نصب فشار ضعیف	۲۴۰۰	۰	۶		۱۴۴۰۰	۰
سمت فشار قوی						
فوندانسیون	۶۰۰۰	۴۰۰۰	۳	۳	۱۸۰۰۰	۱۲۰۰۰
آهن	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۳	۳	۴۵۰۰	۴۵۰۰
زمان نصب (نفر-ساعت)	۵۰	۵۰				
دستمزد هر ساعت	۱۰۰	۱۰۰	۳	۳	۱۵۰۰۰	۱۵۰۰۰
دستمزد نصب فشار قوی					۳۷۵۰۰	۳۱۵۰۰
مجموع هزینه نصب					۲۰۸۴۰۰	۱۷۰۵۰۰

جدول ۲- مقایسه هزینه نصب شده بین واحدهای اندازه گیری نوری و پرسیده از روغن متداول در  $230 \text{ KV}$

در یک اندازه گیری نوع IPP، اطلاعات بهبود یافته می تواند درآمد دریافت کند و از تخمین تلفات ترانسفورماتوری اجتناب کند. برای مثال، یک اپراتور IPP یک اختلاف  $10 \text{ MW}$  را بین اندازه های سطح پائینی و سیستم اندازه گیری شرکت برق پیدا کرد. این  $10 \text{ MW}$  ها در قیمت های ماکزیمم فروخته شدند، و یک ضرر اساسی را به اپراتور اعمال می کنند. اگر هر  $50 \text{ MWhr}$ ، دلار باشد، همراه با  $1000$  ساعت کارکرد تأسیسات در سال،  $500000$  دلار در درآمد تلف شده را خواهیم داشت.

بحث برای دقت بهبود یافته باید بازده کارکرد مناسب را بررسی کند. بودجه خطای در بدترین حالت و دریافت درآمد پتانسیل در جدول زیر نشان داده شده است، پیشرفت‌ها برای شبکه MW ۶۰۰ که ۱۰۰۰ ساعت در سال با قیمت میانگین ۵۰ دلار در مگاوات ساعت تولید می‌کند، را نشان داده است.

	ترانس معمولی	ترانس نوری با اندازه گیر ورودی دیجیتال	ترانس نوری با اندازه گیر ورودی معمولی
ترانس جریان	۰/۳٪	۰/۲٪	۰/۲٪
ترانس ولتاژ	۰/۳٪	۰/۲٪	۰/۲٪
سیم کشی	۰/۱٪	۰	۰
اندازه گیری	۰/۳٪	۰	۰/۳٪
مجموع	۱٪	۰/۴٪	۰/۷٪
توسعه و بهبود		۰/۶٪	۰/۳٪
احتمال توسعه و بهبود		۰/۳۱٪	۰/۱۲٪
توسعه و بهبود در سال	۰ \$	۹۳۰۰۰ \$	۳۶۰۰۰ \$
NPV ۱۵٪ درصد برای ۳۰ سال	۰ \$	۶۱۰۰۰۰ \$	۲۳۶۰۰۰ \$

جدول ۳: دریافت درآمد برای بهبود دقت در یک IPP ۶۰۰ مگاوات

به عنوان یک نکته جالب، وسایل اندازه گیری با رابط دیجیتال مستقیم نسبت به رابط های جریان متداول ۱A و ۵A و رابط های ولتاژ ۶۹۷ و ۱۱۵۷ هنوز در بازار یافت نمی شود. اگر چه موضوع خیلی از بحث های صنعتی است، سازنده های وسایل اندازه گیری به با هوشی سازنده های نوری و تعدادی از خریداران همیشگی نیستند. چندین شرکت در حال حاضر شروع به کار کرده اند. پروتکل های دیجیتال IEC در استانداردهای ۶۰۰۴۴-۷ و ۶۱۸۵۰-۹ یک پایه محکم را تشکیل می دهد، همانند استاندارد UCA-۲. در حال حاضر، رابط های آنالوگ انرژی پائین نسبت به اندازه گیری آنالوگ انرژی بالا و رابط های رله، موجود هستند و این امر تعدادی از هزینه ها و خطاهای

معرفی شده به وسیله تقویت کننده‌های انرژی بالا را کاهش می‌دهد. این رابط‌ها به وسیله استاندارد های ANSI/IEEE پیشنهاد شده اند.

ارتقاء دقت در سطحی بسیار بالا، به طور آشکارا، منجر به افزایش درآمد به میزان زیادی در ولتاژهای بالا و می‌شود. بر روی یک خط انتقال  $500\text{KV}$ ، هزینه برای دکل بسیار قابل توجه است. برای مثال، در بار ماکزیمم خط  $1400\text{MW}$  با کارکرد  $750$  ساعت در سال با قیمت میانگین  $100$  دلار در هر مگاوات ساعت، درآمد حاصل شده با  $3/0\%$  بهبود  $315000$  دلار است. بهبود بیشتر در باردهی کم،  $750\text{MW}$  در  $2000$  ساعت در سال با میانگین قیمت  $30$  دلار در هر مگاوات است که  $135000$  دلار می‌شود.

بهبود سالیانه  $450000$  دلار، هزینه‌های طراحی و نصب را برای واحدهای نوری در کمتر از  $6$  ماه بر می‌گرداند.

بازده کارکرد برای VT های نوری با دقت بهبود یافته، وقتی ما کارکرد را در طول رنج دمایی کامل بررسی می‌کنیم، خیلی آشکار است. به دلیل دقت بالا در طول رنج دمایی کامل توسعه داده شده، بر خلاف VT CC های متداول که پائین‌ترین دقت را در هر دو حد دمای بالا و پائین دارند، شرکت برق بیشترین بهره را در پیک زمستان و تابستان به دست می‌آورد. بعضی از بهره‌بردارها برنامه پیش رونده‌ای برای یکنواخت کردن میدان CC VT های نشان دادند و اعتقاد دارند که خطا حداقل  $1\%$  است. یک بهبود  $0/8\%$  درصدی در اطلاعات ولتاژ از سیستم SCADA شان که اطلاعات را برای پایداری سیستم کنترل برآورد کننده حالت فراهم می‌کند می‌تواند یک بهبود  $0/8\%$  درصدی در ظرفیت سیستم کلی نتیجه بدهد.

بعضی از بهره‌بردارها تطابق مقاومت یدکی تکفاز در  $500\text{KV}$  و  $765\text{KV}$  نمی‌کنند یا آنها خط‌های انتقالشان را جابجا نمی‌کنند. این بهره‌بردارها عدم توازن اساسی ولتاژ فازی را ضبط می‌کنند. بخاطر اینکه این بهره‌بردار خط  $765$  کیلوولتشان را با  $100\text{MW}$  برآورد کرده است.  $100\text{MW}$  را

برای ۲۰۰۰ ساعت در سال در قیمت میانگین ۳۰ دلار در هر مگاوات ساعت محاسبه کنید و آن به یک بهبود سالیانه ۶۰۰۰۰۰ دلار منجر می‌شود.

آنچه تعیین کمیت کردن آن مشکل‌تر است مزایای امنیت و کاهش ریسک هستند. نبودن مکانیزم برای خطای منفجر شدن، فرورزونانس یا اتصال باز ثانویه منجر می‌شود به:

- هزینه کمتر نابودی تجهیزات
- نگرانی‌های کمتر برای تخفیف انفجار و یک محیط کار امن‌تر

### ۳-۳-۵ صرفه‌جویی‌های نگهداری و تعمیرات

عدم وجود روغن یا گاز SF<sub>6</sub> منجر می‌شود به :

- حذف تست میدان
- حذف کنترل و گزارش دادن گاز SF<sub>6</sub>
- حذف هزینه‌های خطای انفجاری

آمارها بر روی خطای انفجاری ترانسفورماتورهای پر شده از روغن متداول، نرخ خطای حدود ۰/۰۷ درصد در سال را نشان می‌دهد. (منبع: گروه کاری Cigre). بهره‌بردارها به ما می‌گویند که پاکسازی چنین خطاهایی هزینه‌ای معادل با ۱۰۰۰۰۰۰ دلار در هر حادثه است. در طول یک دوره سی‌ساله این امر منجر می‌شود به یک ریسک به هزینه ۱۳۸۰۰ دلار در هر سه فاز نصب شده، با فرض کسر کردن یک نرخ ۱۵٪ جریمه اساسی برای هر واحد پر شده از روغن. این هزینه ریسک یک حرکت را به سمت CT‌های متداول پر شده از SF<sub>6</sub> در بعضی بهره‌بردارها بوجود آورده است.

تکنولوژی متداول به آزمایش‌های دو برابر احتیاج دارد که باید هر ۲ تا ۶ سال در یک هزینه برآورد شده حدوداً ۲۰۰۰ دلار در هر نقطه یا ۶۰۰۰ دلار در هر رویداد آزمایشی انجام شود. در بعضی از حدود قدرت، این صرفه‌جویی در مقابل تجهیزات تنظیم یک سیستم نوری در هر ۵ یا ۶ سال

متعادل شده است. یکنواخت کردن میدان از راه یک طرح سبک وزن از محصول نوری (خودش) انجام خواهد شد و قابل چک کردن با یک استاندارد مرجع خواهد بود. در حال حاضر NIST (انستیتو ملی استانداردها و تکنولوژی) برای گسترش دادن استاندارد مرجع بوسیله آنچه با دستگاه‌های جریان زیاد اندازه‌گیری خواهد شد، کار می‌کند که از تکنولوژی پایه مشابهی بر اساس آنچه CT فیبر نوری پایه‌گذاری شده است استفاده می‌کند.

وسایلهایی که از گاز SF<sub>6</sub> استفاده می‌کنند به گزارش کردن و کنترل انتقال گاز احتیاج دارند. یک عامل مهم و قابل توجه این است که، تعیین کرن هزینه خاص شکست کنترل گاز SF<sub>6</sub> سخت می‌باشد.

نسبت دور قابل انتخاب خریدار منجر می‌شود به:

- یدکی‌های سیستم و هزینه‌های در ارتباط با کنترل صورت موجودی کمتر می‌شود.

تکنولوژی نوری به نسبت‌های دور اجازه می‌دهد که قابل انتخاب بوسیله خریدار باشد مثل اینکه وسیله مشابهی می‌تواند هر نسبتی که استفاده کننده احتیاج دارد قبول کند. بنابراین، یک صورت موجودی کالا تنها در هر جا برای یک کلاس ولتاژ خاص ممکن است استفاده شود، که تعداد واحدهای صورت موجودی را که به وسیله بهره‌بردار نگه داشته می‌شود کاهش داده می‌شود. به جای ذخیره کردن چندین واحد متداول با هر نسبت در یک کلاس ولتاژ خاص، یک مجموعه تنها از واحدهای نوری می‌تواند به عنوان یک سیستم ذخیره گسترده خدمت کند. یک تحلیل از یدکی‌های سیستم، یک مجموع ۱۸ واحدی در کلاس ولتاژ ۲۳۰ KV در صورت موجودی را نشان می‌دهد.

	ترانس معمولی	ترانس نوری
تعداد واحد ها	۱۸	۳
ارزش هر صورت کالا	\$ ۴۲۳۰۰۰	\$ ۶۴۰۰۰



۱۵٪ هزینه هر صورت کالا اعمال شده بر هزینه هر سال	\$ ۶۳۴۵۰	\$ ۹۶۰۰
NPV ۱۵٪ برای ۳۰ سال	\$ ۴۰۳۰۰۰	\$ ۶۳۰۰۰
صرفه جویی توسط سیستم نوری		\$ ۳۴۰۰۰۰
تعداد نصب برای هر صورت کالا		۱۰۰
تخمین صرفه جویی برای هر نصب		\$ ۳۴۰۰

جدول ۴: صرفه جویی در صورت موجودی کالاهای کاهش یافته به خاطر کم بودن یدکی‌ها

### ۵-۳-۴ صرفه جویی‌های مصرف دوره نهایی<sup>۹</sup>

عدم وجود روغن یا گاز SF<sub>6</sub> باعث :

- عدم وجود هزینه‌های محیطی در ارتباط با مصرف یک واحد می شود

از طرف دیگر، معلوم کردن کمیت این مزایا مشکل است . برآورد شده است که هزینه‌ای تقریباً برابر ۵۰۰۰ دلار در هر سیستم برای مصرف تجهیزات پر شده از روغن یا پر شده از SF<sub>6</sub> می‌توان در نظر گرفت . در یک ضریب کسر کردن ۱۵٪ در طول یک دوره سی ساله ، مقدار برآیند فعلی آن صرفه جویی ۱۰۰ دلار می‌شد.

### ۵-۳-۵ مثال عملکرد IPP، ۶۰۰MW در ۲۳۰KV

همانند محاسبات قبلی ، یک شبکه ۲۳۰ KV فرض می‌شود ، همراه با دوره ۳۰ ساله و عامل کسر

کردن ۱۵٪.

صرفه جویی مجموع در سیستم نوری سه فاز :

صرفه جویی سرمایه پست و هزینه ساخت : ۳۷۹۰ دلار

بهبود کارایی عملکرد (با فرض بهبود ۱۲٪): ۲۳۶۰۰۰ دلار

دولار	۱۳۸۰۰	صرفه‌جویی به خاطر حذف خطای انفجاری :
دولار	۳۴۰۰	صرفه‌جویی نگهداری و تعمیر (یدکی‌های کمتر) :
دولار	۱۰۰	صرفه‌جویی مصرف دوره نهایی :
دولار	۲۹۱۲۰۰	صرفه‌جویی مجموع در اثر استفاده از دستگاه‌های نوری :

این محاسبات با ملاحظه کاری انجام شده و فقط بخش اندازه‌گیری تأسیسات را بررسی می‌کند. صرفه‌جویی‌ها می‌تواند حتی اصولی‌تر باشد، اگر یک بهره‌بردار از واحدهای نوری متصل به هم برای اندازه‌گیری و حفاظت استفاده کند، یا صرفه‌جویی‌های مازاد در سرمایه واقعی، کانال‌کندن برای کابل، یا دقت بهبود یافته بر اثر استفاده از رابط‌های اندازه‌گیری دیجیتال را بررسی کند.

#### ۴-۵ نتیجه‌گیری

این درست است که فیبر نوری بر پایه سنسورهای ولتاژ و جریان، به طور افزاینده‌ای، بخش ضروری سیستم‌های اندازه‌گیری و کنترل در سراسر آمریکای شمالی هستند. این تغییر مکان استراتژیک باید یک پله به عقب برای تحلیل اساسی و منطقی آنالیز صحیح تجاری را موجب شود. برای مقایسه‌های هزینه بین «نوری» و «متداول» باید موارد زیر را بررسی کرد: هزینه‌های پست، هزینه‌های نصب، هزینه‌های نگهداری، هزینه‌های کاهش انفجار، هزینه‌های امنیت، هزینه‌های محیطی، بازده‌های عملکرد. در حالیکه مزایایی چون محدوده دینامیکی خوب فهمیده شده‌اند، المان‌های مهم دیگر اغلب نادیده گرفته شده‌اند. نسبت‌های دینامیکی CT، توانایی اتصال واحدها، تجهیزات حفاظت فیزیکی کاهش یافته، و حفاظت مهندسی کاهش یافته مثال‌های خوبی هستند.

در حالیکه صنعت ما رشد می‌کند، تکنولوژی جدید، اندازه‌گیری نوری یا هر چیز دیگر، یک نرخ‌گزینش بر پایه تعداد زیادی از عوامل به کار می‌گیرند. به وسیله نوع تجاری، بهره‌بردارها عامل‌های

دارای اندازه را مانند هزینه سیستم و بازده عملکرد را می‌سنجند و آنان تلاش خواهند کرد که به کمیت‌های دیگر مثل نظریات در مورد جهت‌گیری صنعت، خطرپذیری، و سطح رفاه با تأمین‌کننده‌های متنوع بها دهند. هیچکس نمی‌تواند گرایش‌های آینده را حدس بزند، اما تصمیم گرفتن بر اساس یک واژه طولانی و چشم‌انداز وسیع بهترین روشی است که می‌توان مد نظر گرفت.

## فصل ششم

### مقایسه PT های معمولی با ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری نوری

#### ۱-۶ مقدمه

مدت زمان طولانی است که استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ القایی (PT) یا خازنی (CVT) و ترانسفورماتورهای جریان القایی (CT) برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان یا حفاظت سیستم‌های قدرت رایج است. اما با افزایش تقاضای انرژی، ولتاژ انتقال شبکه‌ها افزایش یافت و در نتیجه سطح عایق بندی تجهیزات شبکه قدرت افزایش یافت. از طرف دیگر، با آمدن سیستم‌های حفاظت دیجیتال به

بازار بار ترانسفورماتورهای اندازه گیری کاهش یافت که این منجر به کاهش دقت ترانسفورماتورها شد .

به علاوه ، کثکث به سمت استفاده از سیستم های نوری نه تنها برای انتقال اطلاعات بلکه برای اندازه گیری زیاد شده است . تحت این شرایط ، تحقیقات زیادی برای استفاده از سنسورهای نوری به منظور اندازه گیری جریان و ولتاژ انجام شد نتیجه تحقیقات به بازار آمدن ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان نوری شد .

در فصلهای گذشته اصول کار و ساختمان ترانسفورماتورهای ولتاژ نوری شرح داده شد همچنین در بخش های مختلف کارآیی و مشخصه های آنها به صورت تئوری بررسی شد . اما در این فصل قرار است که ترانسفورماتورهای ولتاژ نوری را از جنبه های مختلف مانند دقت ، عملکردشان در شرایط بحرانی، وزن و حجم و چند مورد دیگر با ترانسفورماتورهای معمولی مقایسه شود . برای این کار در ابتدا مشکلات و عیبهای ترانسفورماتورهای معمولی را شرح داده و سپس موارد بیان شده با عملکرد ترانسفورماتورهای نوری مقایسه می شود . در آخر هم چند مورد از کاربرد عملی آنها در سیستم های واقعی شرح داده می شود .

## ۶-۲-۲ مشکلات و معایب ترانسفورماتورهای اندازه گیری معمولی

ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان معمولی دارای مشکلات و معایبی هستند که استفاده از آنها در پست های جدید در بازنگری است . در اینجا تعدادی از این مشکلات و معایب بیان می شود .

### ۶-۲-۱-۱ احتمال انفجار

در CTها و PTها برای عایق بندی از روغن، گاز SF<sub>6</sub> و یا مواد شیمیایی دیگر استفاده می شود اغلب این مواد مانند روغن که استفاده زیادی هم در ساخت ترانسفورماتورها دارد، قابلیت اشتعال

دارند و در نتیجه احتمال انفجار و آتش گرفتن ترانسفورماتورها زیاد است. انفجار ترانسفورماتور ممکن است که هم به بقیه تجهیزات پست و هم به پرسنل پستها آسیب برساند.

## ۲-۲-۶ اشباع شدن هسته ترانسفورماتور

مسئله اشباع هسته بیشتر در مورد ترانسفورماتورهای جریان اتفاق می افتد. اگر بار تحمیلی به ترانسفورماتور جریان بیش از ظرفیت ولت آمپر آن نباشد و جریان اولیه نیز از حد جریان نامی تجاوز ننماید،  $emf^{l0}$  ثانویه هسته را به اشباع نخواهد برد ولی در خلال شرایط بحرانی و گذرا، جریان اتصال کوتاه متقارن همراه با مولفه dc است که هسته حفاظتی معمولی را به سرعت به اشباع می برد. در اثنای شرایط گذرا امپلانس شبکه اصولاً سلفی است و بین ولتاژ و جریان  $90^\circ$  اختلاف فاز وجود دارد. فقط اگر در لحظه صفر ولتاژ خطا رخ دهد مولفه dc می تواند صفر شود.

در شبکه قدرت جریان اتصال کوتاه تا زمان برطرف شدن اتصالی بوسیله کلید قدرت ادامه می یابد. وظیفه ترانسفورماتور جریان تامین جریان سیستم های حفاظتی است، آنچنان که این جریان نسبت درستی از جریان اولیه (در خلال زمان مورد نیاز برای عمل کردن رله ها) می باشد. ترانسفورماتور جریانی که قادر به اندازه گیری جریان خطای کامل همراه با مؤلفه صد در صد dc باشد و به اشباع نرود باید خیلی بزرگ باشد و بعضی اوقات ابعاد نامعقولی خواهد داشت. تولید چنین ترانسفورماتورهایی گران تمام شده و نصب آن نیز مشکل خواهد بود.

ترانسفورماتورهایی با این خصوصیت فقط زمانی مورد استفاده قرار می گیرند که تبدیل دقیق جریان تحت هر شرایطی مورد نیاز باشد. در بیشتر روشهای حفاظتی و تجهیزات اندازه گیری چنین

نیازی وجود ندارد و بنابراین هسته ترانسفورماتورهایی که در چنین مواردی مورد استفاده قرار میگیرند هر از چندگاهی به حالت اشباع می روند .

به هر حال اگر ترانسفورماتور دارای هسته کوچکی باشد و یا جریان بزرگی به آن متصل شده باشد به طوریکه شار مورد نیاز برای ایجاد خروجی بدون اعوجاج ، از مقدار قابل حصول تجاوز کند در آن صورت کمی قبل از مقدار حد اکثر موج شار، اشباع رخ میدهد . در این لحظه چگالی شار هسته در مقدار ثابت اشباع شده و  $emf$  تولید نمی شود. جریان ثانویه به مقدار صفر می رسد و کل جریان اولیه صرف در اشباع نگه داشتن هسته خواهد شد . هسته در این حالت باقی می ماند تا جریان تحریک به کمتر از مقدار اشباع خود برسد. بنابراین قبل از آنکه جریان اولیه صفر شود هسته نمی تواند از اشباع خارج شود . شکل موجهای جریان سیم پیچ های اولیه و ثانویه و شار هسته در چنین شرایطی در شکل (۶-۱) نشان داده شده است . (این شکل ها مربوط به حالت پایدار متقارن است که جریان بیش از حد نامی شده است.)

## ۶-۲-۳ اثر فرورزونانس<sup>۱۱</sup>

### ۶-۲-۳-۱ ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی

فرورزونانس می تواند در مدارهایی که دارای خاصیت خازنی و سلفی یا هسته آهنی است (سلف غیر خطی) اتفاق بیافتد. ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی با داشتن مقسم ولتاژ خازنی دارای مشخصات غیر خطی چنین مدارهایی می باشند. این پدیده می تواند در هسته ترانس بدلائل مختلفی ناشی از اشباع آغاز شود. برای مثال در خلال یک عمل کلید زنی یک رزونانس نوسانی معمولاً دارای فرکانس کمتر از  $50-60 \text{ Hz}$ ، ممکن است شروع شده و در صورتیکه به طور مؤثر میرا نشود برای مدت زمان طولانی روی ولتاژ با فرکانس نامی قرار گیرد.

### ۶-۲-۳-۲ ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ القایی

در حالیکه فرورزونانس در CVT، نوسانی داخلی بین خازن و هسته مغناطیسی است، فرورزونانس در ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ القایی نوسانی بین ترانسفورماتور شبکه است. نوسان فقط می تواند در شبکه هایی رخ دهد که صفرشان عایق شده است. نوسان می تواند بین خازن موجود در شبکه و زمین و اندوکتانس غیر خطی ترانسفورماتور مغناطیسی رخ دهد. تحریک نوسان می تواند توسط تغییر ناگهانی ولتاژ یا جریان شبکه صورت گیرد. ارایه احتمال بروز فرورزونانس به شکلی کلی مشکل است و بستگی به طراحی ترانسفورماتور دارد. نوسان فرورزونانس در صورتیکه به طور مؤثر میرا نشود خطرناک است. هسته ترانسفورماتور تحت چنین شرایطی کاملاً اشباع بوده و جریان مغناطیس کننده می تواند آنچنان بزرگ باشد که خطر خرابی پیش آید. بنابراین میرا کننده این گونه نوسانات از ضروریات است.

<sup>۱۱</sup> ferro-resonance effect

## ۶-۲-۴ شار پس ماند<sup>۱۲</sup>

این امکان وجود دارد که شار هسته یک ترانسفورماتور در حالت پایدار حول یک حلقه فرعی هیستریزیس واقع بر روی محور B از دیاگرام B-H تغییر کند. چنین عملکردی به طور کلی سبب کاهش دقت تبدیل نسبت به شرایط قابل حصول در وضعیت‌های متقارن می‌شود. این وضعیت می‌تواند به سبب وجود شار پس ماند بوجود آید و بنابراین مقدار شار باقی مانده و تداوم آن مورد توجه قرار می‌گیرد. این عوامل در مورد تجهیزات حفاظتی نیز باید مورد توجه واقع شود چرا که شار پس ماند در هسته ترانسفورماتور جریان از نوسان شار قابل حصول یک جهت می‌کاهد و مساله جلوگیری از رفتن به اشباع را در حالت بروز اختلال بسیار مشکل می‌کند.

در طرحهای حفاظتی که خروجی دو ترانسفورماتور یکسان با هم متوازی شده‌اند، اشباع مساله مهمی نیست چرا که در هر دو ترانسفورماتور بطور همزمان رخ می‌دهد. با وجود این، یک اختلال داخلی می‌تواند مقادیر متفاوتی از شار پس ماند را در دو هسته باقی‌گذارند و باعث شود که در اختلال بعدی ترانسفورماتورها در زمانهای متفاوتی به اشباع رفته و عملکرد غلطی را سبب شوند.

شرایط متعددی وجود دارد که باعث باقی ماندن شار پس ماند در ترانسفورماتور جریان سیستم قدرت می‌گردد. متناسب با نوسان شار در خلال اختلال، حداکثر مقدار شاری که مایل به باقی ماندن در هسته می‌باشد بزرگ است. اگر چه مقادیر بزرگی از شار پس ماند بعد از جاری شدن جریان اختلال در ترانسفورماتور جریان باقی می‌ماند، ولی وقتی که جریان متناوبی در سیم پیچ اولیه مجدداً جاری می‌شود این شارها به سرعت کاهش پیدا می‌کنند. درجه کاهش بستگی به مقدار شار متناوب دارد. برای برطرف کردن کامل شار پس ماند، شارهای متناوب بزرگی لازم است چنین تغییراتی در



هسته ترانسفورماتور جریان حفاظتی در وضعیت کار عادی امکان ندارد و در نتیجه بخش بزرگی از پس ماند تا وقوع اختلال بعدی در هسته باقی می ماند. این مساله باید در طرحهای حفاظتی مد نظر قرار گیرد.

## ۶-۲-۵ وزن و حجم زیاد

با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، سطح ولتاژ شبکه های قدرت هم افزایش یافته است با افزایش سطح ولتاژ تحمل عایقی وسایل و تجهیزات پستها از جمله ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان هم باید اضافه شود که این منجر به افزایش وزن و حجم ترانسفورماتورها شده است. بطوریکه در ولتاژهای خیلی زیاد، علاوه بر بزرگ شدن وزن و حجم ترانسفورماتور قیمت آنها نیز افزایش زیادی می یابد. بزرگ شدن حجم و وزن هم مکان بزرگی جهت نصب لازم دارد وهم نصب کردن آن مشکل ساز است.

## ۶-۲-۶ محدود بودن دقت آنها

ترانسفورماتور ولتاژ، با صرفنظر از افت ولتاژ، ولتاژ اولیه را بی هیچ کم و کاستی به نسبت دور ثانویه به اولیه تبدیل می کند. اما در حالت واقعی چشم پوشی از ولتاژی که روی مقاومت سیم پیچ ها و راکتانس نشتی افت می کند ممکن نیست بنابراین ولتاژ اولیه دقیقاً بازسازی نمی شود. خطای تبدیل هم در دامنه و هم در فاز ظاهر می شود.

در VT ها دقت در کلاس های اندازه گیری حفاظت تقسیم شده است. وقتی که بار، ترکیبی از

مؤلفه های اندازه گیری و حفاظت است کلاس دقت بالاتر مورد نیاز اندازه گیری باید انتخاب شود.

طبق استاندارد IEC 186 و سایر استانداردها کلاس دقت بایستی از ۰.۲۵٪ تا ۱.۰۰٪ بار نامی

برقرار باشد. ابزار و وسایل اندازه گیری جدید بار مصرفی کمتری دارند و بار کلی ممکن است کمتر از

۲۵٪ بار نامی می شود. حداقل خطا عموماً در ۷۵٪ بار نامی است. با تغییر ولتاژ خطا نیز تغییر می کند. این تغییرات مربوط به خواص غیر خطی منحنی تحریک است .

### ۳-۶ مزایای ترانسفورماتورهای اندازه گیری نوری

در بخش قبل تعدادی از معایب و مشکلات ترانسفورماتورهای اندازه گیری معمولی شرح داده شد. در ادامه برای مقایسه بین ترانسفورماتورهای معمولی ونوری، مزایای ترانسفورماتورهای نوری را شرح داده و در هر مورد، مزیت بیان شده با مورد مربوط در ترانسفورماتورهای معمولی مقایسه می شود.

### ۱-۳-۶ عدم احتمال انفجار

در ترانسفورماتورهای نوری از هیچ گونه ماده شیمیایی قابل اشتغال مانند روغن استفاده نمی شود و ساختمان آنها طوری است که اصلاً احتمال آتش گرفتن آنها منتفی است. بنابراین احتمال خطر جانی برای پرسنل پستها و یا آسیب رساندن به سایر تجهیزات پست بدلیل انفجار ترانسفورماتور از بین می رود .

### ۲-۳-۶ عدم ایجاد پدیده فرورزونانس در آنها

بدلیل اینکه از هسته آهنی در ساختمان آنها استفاده نمی گردد پس مدارهای تشدید هم بوجود نمی آید و پدیده فرورزونانس در این ترانسفورماتورها اتفاق نمی افتد .

### ۳-۳-۶ بدون اثر شار پس ماند

در سوم و چهارم که هسته مغناطیسی وجود ندارد اثر شار پس ماند اصلاً بوجود نمی‌آید. همچنین در ها نوع اول و دوم چون هسته آهنی کوچک است مقدار شار پس ماند هم کم است و با جریان متناوب کوچکی از بین می‌رود.

### ۴-۳-۶ وزن و حجم کم

یکی از مزایای OVTها و همچنین OCTها داشتن وزن کم و اندازه کوچک است در دنیای امروزی که مساحت زمین اشغال شده توسط پست‌ها، بخصوص در شهرهای بزرگ یک مشکل اساسی است استفاده از ترانسفورماتورهای اندازه گیری با حجم کم مزیت بالایی دارد. همچنین در پست‌های گازی که به منظور کاهش حجم پستها بوجود آمده اند استفاده از ترانسفورماتورهای اندازه گیری نوری در کاهش حجم پست نقش بسزایی دارد. بعلاوه داشتن وزن و حجم کم امکان نصب راحت تر و سریعتر آنها را نیز فراهم می‌کند.

### ۵-۳-۶ داشتن دقت بالا

برای سنجش ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ نوری باید مشخصه آنها را با کلاسهای دقت استاندارد شده برای ترانسفورماتورهای اندازه گیری مقایسه کرد. در مورد ترانسفورماتورهای ولتاژ نوری می‌توان ادعا کرد که دارای دقت بالایی هستند. برای دلیل بر این ادعا، در شکل (۲-۷) نتایج تست یک OVT نشان داده شده است. از این شکل مشخص است که استانداردهای لازم برآورده شده است برای مقایسه عملکرد OVT با ترانسفورماتور ولتاژ معمولی در شکل (۲-۷) خطای نسبی و خطای فاز یک ترانسفورماتور ولتاژ معمولی نشان داده شده است.

در کل می‌توان نتیجه گرفت که ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری نوری از لحاظ دقت، قابل رقابت با ترانسفورماتورهای معمولی هستند و در بعضی موارد عملکرد آنها خلی بهتر است .

شکل (۷-۸) : مشخصه خطای دامنه و فاز یک

### ۶-۳-۶ داشتن سرعت پاسخ دهی بالا

از ویژگیهای دیگر OVT ، سرعت بالای پاسخ آنها به اختلالات ایجاد شده در شبکه است . در VTها بعلت وجود سلف ، سرعت پاسخ آنها به شرایط گذرای سریع کم است ولی در OCT ها بعلت آنکه سلفی وجود ندارد می‌توان اختلالات سریع را هم تشخیص داد . در حال حاضر در بیشتر پستها، سیستمای ثبت و قایع نصب می‌شود تا اتفاقاتی که در شبکه رخ می‌دهند را ثبت کنند برای انجام هر چه بهتر و کاملتر این کار، باید سعی شود که تمامی وقایع سریع یا کند مانند عمل کلیدزنی که با سرعت بالایی صورت می‌گیرند ، تشخیص داده شود . در این راه داشتن ترانسفورماتورهای اندازه

گیری با سرعت پاسخ دهی بالا از احتیاجات لازم است که OVT ها می توانند این وظیفه را بخوبی انجام دهند .

#### ۴-۶ کاربردهای عملی ترانسفورماتورهای اندازه گیری نوری

در بخش قبل مزایای ترانسفورماتورهای نوری نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی بیان شد . در ادامه بعضی از موارد عملی استفاده از آنها در سیستمهای واقعی شرح داده و نتایجی هم که در محیط واقعی بدست آمده است بیان می شود هدف از بیان این مطالب اطمینان پیدا کردن از کارآیی عملی ترانسفورماتورها نوری است .

ترانسفورماتور ولتاژ نوری : استفاده از این نوع ترانسفورماتور ولتاژ در پستهای GIS زیاد است . برای نمونه در کاربرد عملی ، یک OVT در یک پست GIS ۷۷ کیلو ولت نصب شده است . گزارشهای بعدی حاکی از آن است که خطای خروجی آن در محدوده  $\pm 1\%$  بود و جابجایی فاز خروجی هم در حد  $0/6^\circ$  باقی مانده است .

در کل ، استفاده از ترانسفورماتورهای اندازه گیری نوری در پستهای GIS رایج است و گزارشهای ارائه شده خبر از کارآیی موفقیت آمیز آنها می دهد .

#### ۵-۶ نتیجه گیری

ترانسفورماتورهای معمولی به دلیل اندازه بزرگ و کاهش قابلیت اطمینانشان در شرایط اضطراری، دارای نقطه ضعفهایی در بکارگیری آنها در سیستمهای مدرن هستند . از طرف دیگر با افزایش نیاز به انرژی الکتریکی و نیز نیاز به بالا بردن قابلیت اطمینان شبکه های قدرت فکر ساختن وسایل جدیدی جهت اندازه گیری ولتاژ و جریان به مرحله عمل در آمد . در این راه، با توجه به پیشرفت تکنولوژی المانهای نوری، استفاده از آنها مدنظر قرار گرفت و اساس تکنولوژی جدید المانهای

نوری است که مزایای زیادی نسبت به مدارهای مغناطیسی که در طرح ترانسفورماتورهای معمولی استفاده می‌شود، دارند.

در این تکنولوژی جدید جهت ساخت ترانسفورماتور جریان از اثر مغناطیس - نوری فارادی و برای اندازه‌گیری ولتاژ اثر الکترو - نوری پاکلز کمک گرفته می‌شود. براساس عملکرد این دو اثر، وقتی نور از یک ماده خاص که در میدان مغناطیسی یا الکتریکی واقع شده عبور می‌کند، تغییراتی در بعضی از خصوصیات آن ایجاد می‌شود که جهت اندازه‌گیری آن میدانها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پروژه اصول کار و ساختمان ترانسفورماتورهای جدید به طور کامل شرح داده شد. همچنین مشخصات خروجی و نحوه پاسخ دهی آنها به جریان و ولتاژ ورودی، برای چند نوع مختلف ترانسفورماتورهای نوری بدست آمد و نیز تغییرات خروجی آنها با دما بررسی شد مشاهده شد که کارایی آنها در محدوده بزرگی از جریان و ولتاژ و تغییرات دما عالی است و قابل رقابت با ترانسفورماتورهای معمولی هستند.

در این فصل که به مقایسه ترانسفورماتورهای نوری با ترانسفورماتورهای معمولی پرداخته شد دیدیم که در زمینه‌های مختلف کارایی آنها در حد ترانسفورماتورهای معمولی یا حتی بهتر از آنهاست. ترانسفورماتورهای نوری مشکلات ترانسفورماتورهای معمولی از قبیل اشباع شدن هسته، اثر فرورزونانس و شار پس ماند در هسته و موارد دیگر را ندارند دقت و سرعت پاسخ دهی آنها در مقایسه با روشهای معمولی نیز در حد بالایی است و استانداردهای موجود جهت ارزیابی کارایی ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری را ارضا می‌کنند. حتی اگر ترانسفورماتورهای نوری در موارد خاصی دارای مشکلاتی باشند با توجه به مزایای متعددی که نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی دارند استفاده از آنها قابل توجیه است.

با توجه به آنها هدف پروژه یافتن تکنولوژی جدیدی جهت ساخت ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری بود تا جایگزین ترانسفورماتورهای معمولی شوند این هدف با یافتن ترانسفورماتورهای اندازه

گیری نوری برآورده شده است. در حال حاضر می توان انتظار داشت که در چند سال آینده تکنولوژی جدید جایگزین تکنولوژی موجود خواهد شد. دلیل این ادعا را می توان مرجع [۲] که مربوط به شرکت ABB یکی از معتبرترین شرکت های سازنده تجهیزات شبکه های قدرت می باشد ذکر کرد در این مرجع ادعا شده است که ساخت و نصب یک OCT در یک پست ۳۸۰ کیلو ولت باموفقیت خوبی به انجام رسیده است.

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به اهمیت زیر بنایی و استراتژیکی صنایع برق و بویژه به دلایل حساسیت خاص و نیز پر هزینه بودن طرحهای آن نمی توان ریسک چندانی را در ارتباط با مصرف، کاربرد هر نوع تجهیزات با هر نوع کیفیت متقبل گشت . همچنین از نظر اقتصادی و مقایسه هزینه های اقتصادی - اجتماعی به صرفه و صلاح اقتصاد کشور نخواهد بود که بر روی یک تکنولوژی که بنظر می رسد تا چند سال آینده قدیمی خواهد شد سرمایه گذاری هنگفتی شود بدین ترتیب چنانچه رشد صنایع نیرو مدنظر باشد چاره ای جز این باقی نمی ماند که به مسائل حساسی چون نوع تکنولوژی انتخابی و کیفیت محصولات توجه کافی مبذول گردد . با این توجه بررسی دقیق اقتصادی تکنولوژی جدید ساخت ترانسفورماتورهای اندازه گیری جهت استفاده از آنها در داخل کشور ضروری به نظر می رسد. البته ساخت این وسایل جدید به علت تکنولوژی بالایی که در آنها استفاده می شود در حال حاضر در کشور امکان ندارد ولی تحقیق در مورد کاربرد آنها در پستهای جدید کشور ضروری است .

## ۶-۶ پیشنهادات

با توجه به اینکه در ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری نوری از تکنولوژی بالایی استفاده می‌شود و انجام تحقیقات عملی در مورد آنها نیاز به امکانات و سرمایه‌گذاری وسیعی است به نظر نمی‌رسد که امکانات موجود دانشگاه‌های کشور جوابگوی بررسی عملی آنها باشد، بنابراین پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

۱- تجهیز و راه‌اندازی یک آزمایشگاه نوری مجهز که بتواند پاسخگوی نیاز عملی این مورد و موارد مشابه باشد.

۲- موادی که در ساخت سنسورهای نوری فارادی و پاکلز استفاده می‌شود، جزء مواد گران‌قیمت هستند و در حال حاضر در داخل کشور هم امکان تهیه آنها وجود ندارد. بررسی کامل این گونه مواد و تحقیق و بررسی راه‌های امکان تولید آنها در داخل کشور، می‌تواند در آینده مفید باشد.

۳- بررسی‌های بعمل آمده نشان می‌دهند که بعضی مواد مانند *BSo*، می‌توانند هم اثر فارادی و هم اثر پاکلز از خود نشان دهند یعنی می‌توان از آنها در ساخت ترانسفورماتور جریان و یا ولتاژ بهره برد.

بنابراین بنظر می‌رسد که بتوان با استفاده از این مواد خاص، ترانسفورماتوری ساخت که بتواند وظایف ترانسفورماتورهای جریان ولتاژ را با هم انجام دهد. تحقیق و بررسی در زمینه طراحی و ساخت این ترانسفورماتور دو منظوره می‌تواند تحول جدیدی در صنعت برق و اندازه‌گیری ولتاژ جریان شبکه‌های قدرت ایجاد کند.

۴- قبل از خرید و سرمایه‌گذاری هنگفت در مورد انتقال تکنولوژی، لازم است بررسی کافی در جهت دگرگون شدن آن در صنعت انجام گیرد.





۱-۷ مبدل ولتاژ نوری  $230^{KV}$  توسط سنسور نوری پخش میدان الکتریکی

۱-۱-۷ مقدمه

مراحل طراحی و تست کردن مبدل‌های ولتاژ نوری (OVT) را که از یک سری سنسورهای نوری

میدان الکتریکی کوچک، در ساخت آنها استفاده شده است، را توضیح می‌دهیم. سه OVT،  $230^{KV}$

ساخته شده‌اند و تست‌ها موفق‌آمیزی را در استانداردهای IEC<sup>13</sup> (7-2 and 60044) ، ANSI/IEEE ، C57.13 و خواص داخلی آبی BC (BC Hidro internal specification) گذرانده‌اند . این OVTها حد خطا مورد نیاز کلاس دقت ۰/۲ درصد استاندارد IEC و ۰/۳ درصد استاندارد IEEE را بر آورده کرده‌اند و هم چنین تست‌های ضربه صاعقه ، ضربه‌های ناپیوسته (بریده - بریده) ، تخلیه جزئی ، پایداری در حالت خشک و تر در برابر نوسانات توان و پایداری مکانیکی را با موفقیت گذرانده‌اند . تست‌های بعدی نشان داد که OVTها تنظیم خود را در شرایط شبیه‌سازی پست با شرایط تغییر رساناها در حد تنظیم شده نگه می‌دارند .

OVTها پیشرفت‌هایی زیاد نسبت به ترانسفورماتورهای خازنی و سلفی متداول کرده‌اند . پهنای باند بزرگتر بسیار مهم است ، لازم به تذکر نیست که رنج دینامیکی بیشتر ، وزن کمتر ، سایز کوچکتر و بهبود ایمنی از مزایای آنها هستند . وقتی که فیبر نوری سیگنال نور اندازه‌گیری را از سر سنسور جابجا می‌کند ، کارگر از نظر الکتریکی از تجهیزات فشار قوی عایق شده است و در امان می‌باشد .

تست‌های آزمایشگاهی را بر روی ۳، OVT، ۲۳۰<sup>KV</sup> یکسان مجزا که دارای سه سنسور میدانی الکترونی هستند (که خروجیشان با هم به وسیله روش ربع گاوس ترکیب شده‌اند) تا بتوانند تمامی ولتاژها را تشخیص ، انجام شده است . مقدار اندازه‌گیری شده توسط OVTهای طراحی شده به تغییرات خارجی مهندسی وابسته نیست به عنوان مثال نصب کردن در نزدیکی تجهیزات پست اثری در تنظیم OVTها ندارد . این طرح این چنین است که یک فاصله مناسب زیاد الکترودهای OVT را مجزا می‌کند ، بنابراین گاز نیتروژن سازگار با محیط زیست N<sub>2</sub> ستون را بهتر از گاز SF<sub>6</sub> و لایه‌های پر شده از روغن عایق می‌کند .

<sup>۱۳</sup> این استاندارد در ضمیمه ۳ آمده است .

### ۷-۱-۲ طرح OVT :

روش تریبلی که در زیر توضیح داده شده پایه عملکرد OVT هاست .

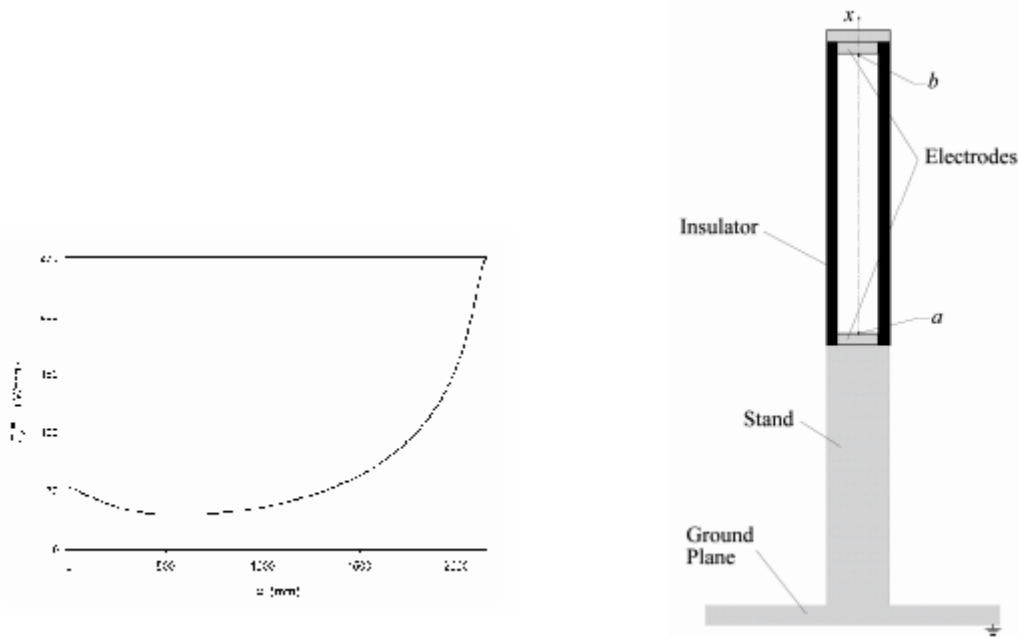
قسمت تئوری : ولتاژ بین ۲ نقطه a و b می تواند مانند یک انتگرال خطی در طول مسیر بین a و b که مؤلفه های میدان الکتریکی آن مسیر هستند بیان شود که تانژانت مسیر است . گرفتن مسیر انتگرال بین a و b در راستای محور x و تخمین زدن انتگرال با یک سیگما (مجموع) نشان داده شده است :

$$V_{ba} = -\int_a^b E_x(x) dx \approx \sum_{i=1}^N \alpha_i E_x(x_i) \quad (1)$$

که در آن  $E_x$  مولفه x میدان الکتریکی است، N تعداد نمونه هاست،  $x_i$  موقعیت نمونه ها و  $\alpha_i$

وزن نمونه هاست.

روش تریبعی بعضی از اصول پایه طرح ما را تعیین می کند : تعداد مورد نیاز سنسور (N)، جای دقیق قرار گرفتن آنها  $x_i$ ، چگونگی وزن دادن به هر خروجی  $\alpha_i$ . همچنین روش تریبعی یک شکل هندسی خاص ، سیستم معین غیرآشفته و بدترین حالت آشفته می دان را در طول مسیر انتگرال گیری فرض می کند . یک سیستم غیر آشفته همانند هر ترتیب خاصی از هادی ها و پوشش ها (media) معین می شود ، برای آنجایی که یک  $E_x$  خاصی در طول محور  $x$  بین  $a$  و  $b$  وجود دارد که با  $E_x^{unp}$  نشان داده می شود . سیستم بدون آشفته ، شامل OVT قرار گرفته بر روی سطح زمین (صفحه زمین) است و محور  $x$ ها در امتداد محور تقارن OVT قرار دارد (شکل ۱) . برای OVT ما،



فضای بین ۲ الکترود ،  $b-a$  ،  $2/16m$  است و شکل ۲ شبیه سازی  $E_x^{unp}$  را نشان می دهد .

شکل ۱ : ساختار یک OVT بدون اختلال      شکل ۲ :  $E_x^{unp}$  برای OVT ۲۳۰ کیلو ولت با اعمال ۱۴۰ کیلو ولت

ما تعیین کردیم که سه سنسور میدان ( $N=3$ ) برای طرح OVT بعد از وزن کردن دقت لازم در مقابل رفتار مشاهده شده  $E_x$  تحت شرایط آشفته کافی است . به ویژه ، OVT ،  $230^{KV}$  باید سطح دقت استانداردهای (IEC ، ۰/۲٪) را به دست آورد . و آن دقت را در طی تغییرات هدفمند تجهیزات نزدیک

به آن در پست‌ها حفظ کند. فاصله حداقل تنظیم شده بین وسایل فشار قوی در هر پستی محدوده این آشفتگی‌ها را ثابت می‌کند. عموماً کمترین (کمی) تغییر در شکل OVT، باعث پیچش زیادی در میدان الکتریکی OVT می‌شود، بنابراین تعداد نمونه بیشتر برای رسیدن به دقت مورد نیاز است. انواع گوناگونی از اختلالها شبیه سازی شد که شامل انحراف‌های همسایگی فاز و نزدیکی به یک کره رسانا می‌شد. مدل‌های OVT (OVT‌های مدل) ولتاژ را با خطای کمتر از ۰/۲ درصد برای این نوع اختلال‌های اندازه گرفتند.

روش خطای تربیعی با  $E_x^{ump}$  (نشان داده شده در شکل ۲) و مقدار N انتخابی، به ما کمک کرد تا موقعیت (وزن هر سنسور) را مشخص کنیم؛ مقادیر واقعی در جدول شماره ۱ آمده است.

شماره نمونه	$x_i [mm]$	$\alpha_i$
۱	۲۳۱/۰۴	۰/۶۰۰۴۸
۲	۱۲۲۹/۶۹	۱
۳	۱۹۹۷/۶۵	۰/۴۱۶۸۱

جدول ۱: وزن و موقعیت محاسبه شده نمونه‌ها (سنسور وسطی و وزنش نرمالیزه شده است).

بعداً سنسورها در محل‌های نمونه سورا شدند و خروجی‌هایشان به طور واقعی توسط ولتاژ تغذیه گشت تا بتوان ولتاژ میانگین را حساب کرد. محاسبات انتگرالی سنسورهای میدان الکتریکی را طوری در نظر می‌گیرند که انگار آنها به طور ایده‌آل یک مولفه مجزای میدان الکتریکی را در یک نقطه اندازه می‌گیرند. در این حالت، سنسور مجزای ما در اصل یک نمونه کوچک با کریستال استوانه‌ای اثر Pockels با ارتفاع ۲ سانتیمتر و قطر ۳/۵ میلی‌متر است که محور آن با محور تقارن عایق تراز شده، درون سنسور، نوری که در امتداد محور کریستال حرکت می‌کند توسط مؤلفه محوری میدان الکتریکی مدوله می‌گردد. سپس، سخت‌افزار DSP سیگنال ما را کشف رمز کرده و بعداً میدان الکتریکی را برای کاربردهای واقعی مجتمع می‌سازد.

### ۳-۱-۷ برپایی آزمایش:

شکل ۳ دو تا از سه سنسور مشابه  $230\text{KV}$  OVT را که در لابراتوار فشار قوی تحت آزمایش هستند را نشان می‌دهد. در ساخت این OVTها که هر یک حدود  $220\text{Kg}$  وزن دارند، از گاز نیتروژن برای پر کردن آنها با فشار  $10\text{ psi}$  استفاده شده است. همانطور که در شکل مشخص است هر OVT توسط یک نگهدارنده زمین شده با ارتفاع  $2/5\text{m}$  حفاظت می‌شود. سنسورهای میدان الکتریکی در موقعیت‌های نشان داده شده در جدول ۱ قرار داده شدند. فیبرهای نوری که توسط کابل‌ها محافظت می‌شوند نور را از OVT و به OVT انتقال می‌دهند.

در اتاق کنترل ادوات الکترونیکی قرار دارد و خروجی آنالوگ و دیجیتال را فراهم می‌آوردند. خروجی آنالوگ OVTها برای ولتاژ کاربردی (نامی)  $140$  کیلوولت، حدود  $2$  ولت است که نسبت تبدیل ولتاژ آن  $7000/1$  را به ما می‌دهد.



شکل ۳: مجموعه تست فشار قوی برای OVT  $230$  کیلوولت

آزمایشات صنعتی فراوانی انجام گرفت (به موازات استانداردهای IEC):

تست دقت، تست ضربه‌صاعقه، تست رطوبت، تست مقاومت، توان - فرکانس، تست تخلیه بار

جزئی، تست ضربه (ایمپاس) بریده بریده- و نیز تست‌های مکانیکی.

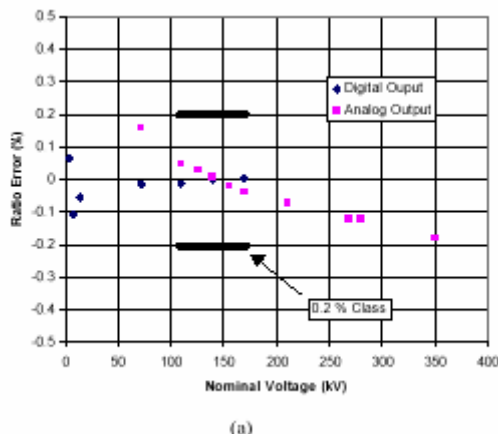
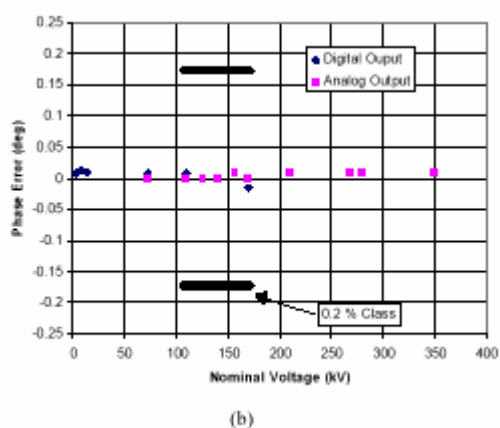
همچنین ، تست‌های ویژه‌ای که شرایط ایستگاه واقعی را شبیه‌سازی می‌نمایند ، انجام گرفت تا بتوان دقت دستگاه را هنگام تغییرات در شرایط رساناها ارزیابی نمود .

دستگاه OVT با موفقیت تمام ، همه تست‌های مقاومت را گذراند . همچنین OVT در قطبیت منفی، ایمپالس‌های برج کامل تا  $1211^{KV}$  - (که حتی از دامنه استاندارد ایمپالس برج کامل  $1050^{KV}$  هم تجاوز کرد) بدون هیچ تخلیه بار یا شکست عایق مقاومت کرد . همانطور که پیش‌بینی می‌شد ، طراحی عایق دفعی استاندارد OVT ، خواص مکانیکی و الکتریکی موفق عایق ، بخصوص مقاومت مکانیکی فشار قوی را به همراه دارد . بازبینی اندازه‌گیری اندازه و فاز خروجی ولتاژ مرجع اساس تست‌های خطی را روی هر سه OVT شکل داد . هر کدام IEC را با  $0/2$  درصد گذراندند ، به این معنی که اندازه خطا از  $0/2 \pm$  درصد تجاوز نمی‌کند و خطای جابجایی فاز در  $0/80$  ،  $0/100$  و  $0/120$  ولتاژ نامی از  $10 \pm$  دقیقه تجاوز نمی‌کند .

در واقع اندازه خطای OVTها کمتر از  $0/1$  درصد و خطای جابجایی فاز  $1$  دقیقه یا کمتر بود . OVTها یک تأخیر فاز  $0/95$  درجه را هنگام تست به اشتراک گذاشتند . در آینده ، کاربران قادر خواهند بود ، تا تأخیر فاز OVT را خودشان تنظیم کنند . تحت ولتاژ ضربه‌ای کلیدزنی ، OVT شکل موج را دنبال کرد که این نیز نشان دهنده پهنای باند بالا و یک محدوده وسیع دینامیکی برای این دستگاه می‌باشد .

لازم به ذکر است تمامی خطاهای اندازه و فاز خارج از محدوده استاندارد ولتاژ ظاهر شدند . شکل ۴ این خطاهای اندازه و فاز را برای ولتاژهای بین  $3^{KV}$  و  $350^{KV}$  نشان می‌دهد. در این محدوده خطای اندازه حدود  $0/2$ ٪ و خطای فاز حدود  $1$  می‌باشد (۱ دقیقه).

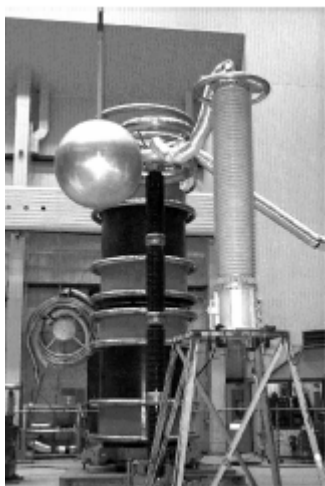




شکل ۴: (a) خطای اندازه (b) خطای فاز

توسط یک صفحه فلزی عمودی زمين شده ، ما توانستيم دقت دستگاه را براي اشياء نزديک بياييم . شکل ۵ را ملاحظه نماييد .

شکل ۶ یک کره فلزی زمين شده به قطر ۱m را که نزديک OVT است را نشان می‌دهد هم‌چنين با یک واگن زمين شده نزديک هم دقت خوبی ثبت شد (شکل ۷) و دقت در حالیکه ۳m دورتر از OVT خارج از فاز بوديم ، حدود ۱۲۰ درجه اندازه‌گیری شد .



شکل ۶: کره زمين شده در ارتفاع وسط و فاصله ۱/۶ متر



شکل ۵: صفحه زمين شده در فاصله ۱/۶ متر

جدول ۲ را برای خلاصه‌ای از خطاها ملاحظه نماييد که هر یک کم‌تر از ۰.۲٪ است و نیز خطای جابجایی فاز کم‌تر از ۱ دقیقه است . توجه کنید که با فاصله شیء اختلال‌زا را به این ترتیب تعريف کرده‌ايم : فاصله بين لبه شیء و محور تقارن OVT . یک فاصله ۲ متری (فاصله فاز حداقل نامی برای

خطوط ۲۳۰ کیلوولت) یا کمتر، در واقع غیر ایمن در نظر گرفته می شود و نباید در یک پست برق به کار برود .

نوع آشفستگی	فاصله (متر)	ارتفاع	درصد خطا
بدون آشفستگی	----	----	۰/۰۰
صفحه زمین شده	۱/۶	----	۰/۱۴
کره زمین شده	۲/۲	متوسط	۰/۰۳
کره زمین شده	۱/۶	متوسط	۰/۰۷
واگن زمین شده	۱	کم	-۰/۰۷
نزدیکی فاز در ۱۲۰ درجه	۳	----	(-۰/۰۱°)۰/۰۴

جدول ۲: درصد خطا برای آشفستگی های مختلف

جدول ۳ تغییرات اندازه گیری شده را در  $E_x$  در موقعیت سنسورها نسبت به مقادیر اصلی  $E_x$  نشان

می دهد ، که این هم تأثیر مثبت روش تجمع عددی در طراحی OVT را نشان می دهد .

نوع آشفستگی	$\Delta E_{x,1}$	$\Delta E_{x,2}$	$\Delta E_{x,3}$
صفحه زمین شده در ارتفاع ۱/۶ متر	%-۲۸/۹	%۱/۹	%۱۴/۰
صفحه زمین شده در ارتفاع ۲/۲ متر	%-۵/۵	%۱/۰	%۲/۳
کره زمین شده در ارتفاع ۱/۶ متر، وسط	%-۱۱/۵	%۰/۸۵	%۵/۳
واگن زمین شده	-۵	%۱/۴	%۱/۵
نزدیکی فاز در ۱۲۰ درجه	(-۹/۹۵°)%-۱۴/۷	(۰/۱۵°)%۰/۴	(۴/۱۵°)%۸/۹

جدول ۳: تغییرات  $E_{x,i}$  برای آشفستگی های مختلف



شکل ۷: واگن زمین شده در نزدیکی تجهیزات

سه OVT،  $230\text{KV}$  مشابه نصب و آزمایش شدند. طراحی OVT بر اساس روش خطای تربیعی بوده و از روش اجتماع عددی استفاده کرده و تنها ۳ سنسور میدان الکتریکی برای اندازه‌گیری ولتاژ خیلی دقیق به کار می‌روند. یکی یا بیشتر از OVTهای مشابه به تحت آزمایشات الکتریکی و مقاومت مکانیکی IEC گوناگون قرار گرفت و تمام این تست‌ها با موفقیت گذرانده شدند. تمام OVTها با موفقیت دقت  $\pm 0.2\%$  را برای استاندارد IEC 60044-7FDIS به دست آوردند. یعنی خطای اندازه بین  $\pm 0.2\%$  و خطای جابجایی فاز بین  $\pm 10$  دقیقه به دست آمد. تست‌های بعدی نشان دادند که اندازه‌گیری ولتاژ OVTها برای حالت گوناگون اختلال میدان الکتریکی ایجاد شده توسط اشیاء فلزی نزدیک (در فواصل امن و ناامن از OVT) و یک OVT مجاور دارای دقت  $\pm 0.2\%$  است شواهدی مبنی بر اختلال به صورت تغییر در اندازه میدان الکتریکی در سنسور میدان هم بوجود آمد که نشان دهنده بازدهی روش ما مبتنی بر روش خطای تربیعی است.

## ۲-۷ مبدل‌های ولتاژ نوری بدون SF<sub>6</sub> باند پهن ۱۳۸ کیلوولت و ۳۴۵ کیلوولت

### ۲-۷-۱ مقدمه:

این مبحث طراحی و تست کردن به فرم جدید سازگار با محیط زیست ترانسفورماتورهای ولتاژ نوری ۳۴۵<sup>KV</sup> و ۱۳۸<sup>KV</sup> را که برای اندازه‌گیری و حفاظت رله‌ای سیستم‌های توزیع قدرت الکتریکی ولتاژ بالا به کار می‌روند را توضیح می‌دهد. هر OVT از سه سنسور میدان الکتریکی نوری کوچک که در یک پوسته مقاومتی واقع شده‌اند، استفاده می‌کند. مکان سنسورهای میدان الکتریکی، پارامترهای هندسی و الکتریکی محفظه مقاومتی و فرمولی که برای به دست آوردن ولتاژ از اندازه‌های میدان الکتریکی، همهٔ موارد بالا با استفاده از روش تریبویی برای رسیدن به اندازه‌های دقیق ولتاژ انتخاب شده‌اند. محفظه مقاومتی در داخل یک عایق نامرئی فشرده که با گاز نیتروژن خشک کم فشار پر شده است، جا گرفته است. تست‌های مرسوم و مقاومت دی‌الکتریکی نشان می‌دهد که OVTها استانداردهای دقیق کلاس ۰/۲، ۶۰۰۴۴-۷ IEC و ۰/۳، ۵۷/۱۳ IEEE/ ANSI C را (کلاس دقت ۰/۲ و ۰/۳) رادار است و نیازهای عایقی‌اش برآورده شده است. تست‌های اضافی نشان می‌دهد که پهنای باند بالایی (بزرگتر از ۴۰<sup>KHZ</sup>) دارند و نشان می‌دهد که خوشبختانه اثرهای ممکن مزاحمتی میدان الکتریکی را روی اندازه ولتاژ قبول نمی‌کنند و تأثیر نمی‌دهند.

تکنولوژی OVTها حالت‌های جذاب‌تری را نسبت به تکنولوژی‌های مرسوم ترانسفورماتورها یعنی ترانسفورماتورهای ولتاژ القایی و ترانسفورماتورهای خازنی ارائه می‌دهد. به دنبال موفقیت‌هایی که OVT تا کنون داشته مزایای متعددی را نسبت به ترانس‌های اندازه‌گیری ولتاژ معمولی ارائه می‌دهد و این مزیت‌ها عبارتند از: اندازه کوچک، وزن کم، پهنای باند زیاد و بازدهٔ دینامیکی بزرگ. استفاده از فیبر نوری برای انتقال اندازه‌گیری‌های سنسور از وسایل فشار قوی، عایق‌بندی شیمیایی ایمنی را در برابر مزاحمت‌های الکترومغناطیسی تضمین می‌کند.

به طور معمول OVT های صنعتی موجود ، یک اشکال باقیمانده را تحمل می کنند . همانند ترانسفورماتورهای معمولی، آنها دارای ولتاژهای بالا و الکترودهای زمین شده در کنار یکدیگر هستند ، که چند سنسور یا یک سنسور نوری بین آنها قرار گرفته اند . این خصوصاً به عایقهای ناسازگار با محیط زیست ، مانند گاز SF<sub>6</sub> و روغن برای حمایت در برابر نتیجه کشش های (Stress) میدان الکتریکی زیاد ، نیاز دارد . در اینجا OVT های ۱۳۸<sup>KV</sup> و ۳۴۵<sup>KV</sup> جدیدی که همگی آنها برای هر دو استعمال اندازه گیری و حفاظت به کار می روند تمامی مزایای تکنولوژی های OVT های موجود را دارا هستند ، اما نیاز به عایق نبندی خاصی ندارند را توضیح می دهیم . بر اساس گزارش های قبلی ، این OVT ها بر پایه روش تربیعی هستند اما همچنین آنها ضریب نفوذ محافظ (محافظت فاراده) را برای فعال کردن دقت اندازه گیری ولتاژ حتی با وجود سخت ترین مزاحمت های ممکن میدان الکتریکی ، به کار می گیرند . بنابراین برای انتخاب دقت و انتخاب عایق های این OVT مطابق استاندارد ترانسفورماتورهای IEEE و IEC، یک سری کامل از تست ها انجام شده است و نتایج ارائه می شود .

## ۲-۲-۷ اصول طرح و کارکرد

دو ایده اصلی از پایه عملکرد OVT ها در اینجا ارائه شده : روش تربیعی و ضریب نفوذ محافظ (محافظت فاراده) .

روش تربیعی برای تخمین زدن تعداد مورد نیاز سنسورهای میدان الکتریکی، موقعیت آنها ، و ترکیب اندازه گیری آنها برای رسیدن به ولتاژ دقیق اندازه گیری خواسته شده ، برای ساختمان OVT های مخصوص، و برای بدترین مزاحمت میدان الکتریکی مورد انتظار (اثر پخش میدان) در مکان سنسورها ، استفاده می شود . ولتاژ اندازه گیری شده توسط یک مجموع از مقدار میدان الکتریکی خوانده شده ، توسط سنسورها است که با فرمول زیر بیان می شود :

$$V_{ba} = -\int_a^b E_x(x) dx \approx \sum_{i=1}^N \alpha_i E_x(x_i) \quad (1)$$

که در آن  $V_{ab}$  ولتاژ اندازه‌گیری شده بین نقاط  $a$  و  $b$  است و  $E_x$  مولفه  $x$  میدان الکتریکی در امتداد محور  $x$  هاست،  $N$  تعداد سنسورهاست،  $x_i$  موقعیت  $i$  امین سنسور است و  $\alpha_i$  وزن خواندن  $i$  امین سنسور است. در هر OVT، محور  $x$ ، خط راستی است بین دو الکتروود داخلی OVT،  $a$  و  $b$  نقاطی هستند که محور  $x$  سطح ۲ الکتروود را قطع می‌کند.

با بکارگیری محافظت فاراده به شکل لوله‌های عمیق حول محور  $x$  و سنسورها که بین الکتروودها هستند می‌توان اثرات پارازیت میدان را به طور قابل توجهی کم کرد. این مهم‌ترین کاربرد ساختار OVT است که خروجی روش تربیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مسئله باعث کاهش قابل توجه سنسورهای میدان الکتریکی مورد نیاز جهت تأمین دقت در حضور هر گونه مزاحمت (پارازیت) میدانی می‌گردد.

اندازه OVT معادل یک عایق مرکب HV است. الکتروودهای داخلی در انتهای عایق سوار می‌گردند، که اندکی از لبه فلانش (وسیله اتصال لوله) بیرون می‌زند، و در ضمن با فواصل زیادی از هم قرار دارند. برای OVTهای  $138^{KV}$ ، فاصله حدود  $1m$  و برای  $345^{KV}$ ، حدود  $2/2$  متر است. در نتیجه هیچ روغن یا گاز  $SF_6$  مورد نیاز نیست و عایق با گاز نیتروژن که فشار (حدود  $140Kpa$ ) بالاتر از فشار جو (جهت تأمین عایقی پر شده است).

بین الکتروودها یک لوله مقاوم عمیق استوانه‌ای قرار دارد. مقاومت لوله‌های محافظ حدود  $100 M\Omega$  و  $200 M\Omega$  به ترتیب برای OVTهای  $138^{KV}$  و  $345^{KV}$  می‌باشد.

سه سنسور نوری میدان الکتریکی درون محافظ‌های مقاوم قرار داده شده‌اند. اساساً یک سنسور میان ۲ الکتروود است، و دو تای دیگر بالا و زیر سنسور میانی قرار دارند، نزدیک الکتروودها، فیبرهای نوری، نور را از سنسورها و به این سنسورها انتقال می‌دهند. دور از محیط HV، سیگنال‌های سنسور

آشکار شده ، پردازش شده ، وزن شده و بر حسب فرمول (۱) جمع می‌گردند ، توسط ادوات الکترونیکی آنالوگ و دیجیتال تأخیر زمانی حدود  $40\text{ M}\Omega$  است . جبران سازی فازی دیجیتال ایجاد تغییر مکان فازی ۰ درجه برای فرکانس  $60\text{ HZ}$  به کار می‌رود .

### ۳-۲-۷ نتایج تست‌های آزمایشگاهی ولتاژ بالا:

همانطوری که در بالا توضیح داده شده یک  $138\text{ KV}$  OVT و یک  $345\text{ KV}$  OVT ساخته و در یک لابراتوار HV تست شدند .

(شکل ۱) کابل فیبر نوری هر OVT را به ادوات الکترونیکی که در اتاق کنترل مستقر بودند ، متصل کرد . جایی که دستیابی به داده‌های دیجیتال انجام می‌گیرد خروجی این ادوات از یک مبدل D/A (دیجیتال به آنالوگ) و یک آمپلی فایر توان گذشت تا بتوان خروجی ولتاژ آنالوگی را که برای آزمایش به کار می‌رفت ارائه کند . OVT ،  $138\text{ KV}$  یک نسبت تبدیل متغیر از ۱:۱۲۰۰ یا از ۱:۷۰۰ دارد و OVT ،  $345\text{ KV}$  دارای نسبت‌های ۱:۳۰۰۰ یا ۱:۱۸۰۰ می‌باشد .

### ۱-۳-۲-۷ بازدهی در مورد دقت

با به کارگیری یک پل استاندارد به عنوان مرجع ، خطاهای اندازه و فاز در محدوده وسیعی از ولتاژها ثبت شد . OVTها طبق IEC ۰/۲ و IEEE ۰/۳ می‌باشند و این دقت‌ها را در محدوده‌هایی که حتی خارج از حدود استاندارد مورد نیاز حفظ می‌کنند . اشکال ۲ و ۳ ضرایب تصحیح ترانس ( $\text{TCF}^{14}$ ) و ضرایب تصحیح اندازه ( $\text{RCF}^{15}$ ) و خطای فاز برای OVTهای  $138\text{ KV}$  و  $345\text{ KV}$  را نشان

<sup>۱۴</sup> Transformer Correction Factors

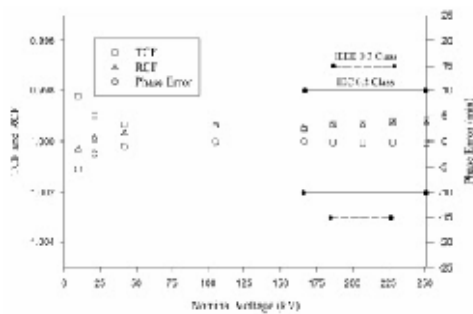
<sup>۱۵</sup> Ratio Correction Factors

می‌دهند. باید توجه داشت که این در واقع محدوده دینامیکی آمپلی فایر توان است که محدوده

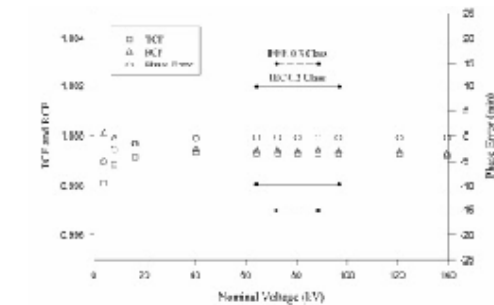
اندازه‌گیری OVT را محدود می‌کند و نه خروجی ذاتی دیجیتال OVT را.



شکل ۱: مقسم ولتاژ مرجع در سمت چپ، ترانسفورماتور قدرت در سمت راست



شکل ۳: TCF، RCF و خطای فاز برای OVT، ۳۴۵ KV



شکل ۲: TCF، RCF و خطای فاز برای OVT، ۱۳۸ KV

OVTها پهنای باند معادل حدود ۴۰ KHZ دارند، اگر چه نشان دادن بازدهی و کارایی باند پهن

آنها مشکل است، محتویات هارمونیک‌های خروجی OVT، ۱۳۸ KV با محتویات تقسیم‌گر مرجع

مقایسه گردید. که عرض باندی حدود ۳KHZ دارند. برای این آزمایش، ولتاژ اعمالی توسط یک

ترانس قدرت بدون مدار تیونینگ (شکل ۱) ایجاد گردید، جهت بدست آوردن یک سیگنال پر -

هارمونیک. پارازیت کلی هارمونیک (Total Harmonic Distortion) در سیگنال مرجع و سیگنال

OVT حدود ۰.۵/۲۱٪ و ۰.۵/۲۷٪ اندازه‌گیری شدند. جدول ۱ اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد، به عنوان



درصد بزرگی مولفه اساسی ۶۰HZ، از مولفه‌های هارمونیک درسیگنال‌های OVT و مرجع تا ۱۵امین

هارمونیک . تشابه بسیار عالی بین OVT و مرجع مشاهده گردید .

شماره هارمونیک	مرجع	OVT
۱ (اصلی)	۱۰۰	۱۰۰
۲	۰/۰۵	۰/۰۳
۳	۴/۳۱	۴/۳۷
۴	۰/۰۲	۰/۰۲
۵	۲/۷۵	۲/۷۶
۶	۰/۲۱	۰/۲۱
۷	۰/۹۶	۰/۹۶
۸	۰/۰۴	۰/۰۴
۹	۰/۵۱	۰/۵۳
۱۰	۰/۰۳	۰/۰۳
۱۱	۰/۱۶	۰/۱۷
۱۲	۰/۰۱	۰/۰۱
۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳
۱۴	۰/۰۱	۰/۰۱
۱۵	۰/۰۴	۰/۰۴

جدول ۱ : مقادیر مؤلفه های هارمونیک (مقادیر جدول ، به صورت درصدی از هارمونی اصلی بیان شده است )

به منظور تست دقت OVT در حضور پارازیت‌های قوی میدانی ، تست‌های آلودگی - مه انجام

گرفتند این آزمایشات شامل ریختن مخلوط اب نمک گلی بر روی سطح محفظه و خشک شدن آن

می‌باشد (شکل ۴). سپس، OVT در معرض مه مصنوعی غلیظی در یک اتاقک مه قرار می‌گیرد و در

این حالت اندازه‌گیری‌ها در ولتاژ اعمالی انجام می‌گیرند . همانطور که رطوبت بر روی سطح OVT

افزایش می‌یابد ، ناحیه‌های رسانایی تشکیل می‌گردند و این نواحی میدان‌های الکتریکی مجاور را

تحت تأثیر قرار می‌دهند . در واقع اینها شدیدترین نوع پارازیت میدانی را به وجود می‌آورند که ممکن

است یک OVT در شرایط محیط بیرون با آن مواجه گردد .



شکل ۴: OVT، ۳۴۵ KV با آلودگی خشک بر روی سطح

جدول ۲ و ۳ به ترتیب خطای اندازه، خطای فاز و TCFها را حین تست آلودگی چه برای OVTهای ۱۳۸ KV و ۳۴۵ KV نشان می‌دهند هر دو OVT، استاندارد دقت IEC ۰/۲ (±۱۰ min، ±۰/۲٪) و IEEE ۰/۳ (۱/۰۰۳ < TCF < ۰/۹۹۷) را در حین تست دارا می‌باشند.

در خلال تست آلودگی، جرقه صوتی و قابل رویت قابل ملاحظه‌ای به خاطر مناطق رسانا در طول عایق بوجود آمد. تأثیرات قوسی لزوماً جرقه‌هایی هستند که در نواحی کوچک جدا کننده بین نواحی رسانا هنگام رسیدن میدان الکتریکی به ماده (هوا) ایجاد می‌شوند (به خصوص وقتی ولتاژ نزدیک ماکزیمم خود باشد). این پارازیت‌های ناحیه‌ای دینامیک هم چنین بر میدان الکتریکی در محل سنسورها، تأثیر می‌گذارند، و به عنوان اندازه‌های موقت سنسورهای میدانی ظاهر می‌شوند.

ولتاژ ( کیلو ولت )	زمان تا نیرو دادن(دقیقه)	درصد خطا	خطای فاز (دقیقه )	TCF
۸۰/۵	۱	۰/۱۴	۱/۸	۰/۹۹۹۲۹۴
۸۰/۵	۵	۰/۱	۱/۲	۰/۹۹۹۴۶۳
۸۰/۵	۱۱	-۰/۰۵	-۰/۶	۱/۰۰۰۲۶۹
۸۰/۵	۱۵	۰/۰۰	-۱/۸	۰/۹۹۹۳۰۸
۸۰/۵	۲۱	-۰/۰۷	-۳/۰	۰/۹۹۹۵۴۷
۸۰/۵	۲۵	-۰/۱۱	-۴/۲	۰/۹۹۹۴۸۶
۸۰/۵	۳۱	-۰/۱۳	-۴/۸	۰/۹۹۹۴۵۶
۸۰/۵	۳۵	-۰/۱۵	-۵/۴	۰/۹۹۹۴۲۵
۸۰/۵	۴۱	-۰/۱۵	-۵/۴	۰/۹۹۹۴۲۵
۸۰/۵	۴۵	-۰/۱۴	-۶/۰	۰/۹۹۹۰۹۴
۸۰/۵	۵۱	-۰/۱۷	-۶/۰	۰/۹۹۹۳۹۵
۸۰/۵	۵۵	-۰/۱۶	-۶/۶	۰/۹۹۹۰۶۴
۸۰/۵	۶۱	-۰/۱۳	-۶/۶	۰/۹۹۸۷۶۳

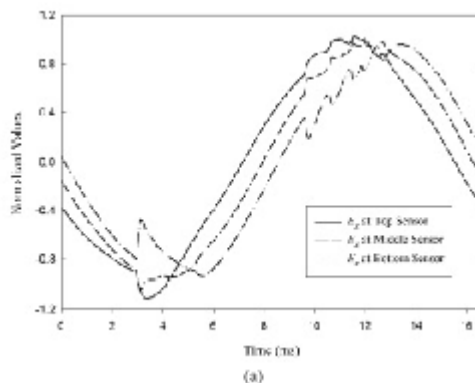
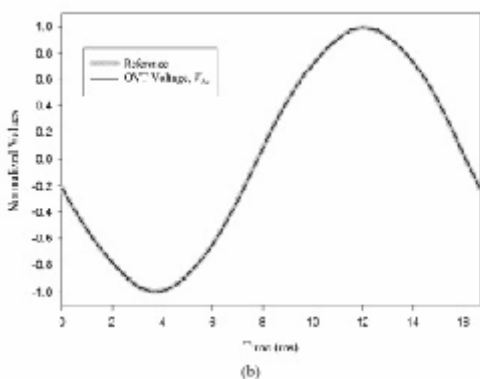
جدول ۲: خطای اندازه، خطای فاز و TCFها را حین تست آلودگی برای OVT ۱۳۸ کیلو ولت

ولتاژ ( کیلو ولت )	زمان تا نیرو دادن(دقیقه)	درصد خطا	خطای فاز (دقیقه )	TCF
۲۰۹	۱	۰/۱۳	۶/۶	۱/۰۰۱۲۴
۲۰۹	۷	۰/۱۰	۴/۸	۱/۰۰۰۸۴۷
۲۰۹	۱۳	۰/۰۷	۶/۰	۱/۰۰۱۶۰۸

۲۰۹	۱۹	۰/۰۳	۳/۰	۱/۰۰۰۸۵۴
۲۰۹	۲۴	۰/۰۱	۲/۴	۱/۰۰۰۸۲۳
۲۰۹	۳۰	۰/۰۱	-۱/۲	۰/۹۹۹۴۳۸
۲۰۹	۴۰	۰/۰۱	-۲/۴	۰/۹۹۸۹۷۷
۲۰۹	۴۵	۰/۰۲	-۴/۸	۰/۹۹۷۹۵۴
۲۰۹	۴۹	۰/۰۰	-۴/۲	۰/۹۹۸۳۸۵
۲۰۹	۵۵	-۰/۰۱	-۴/۲	۰/۹۹۸۴۸۵
۲۰۹	۶۰	-۰/۰۱	-۴/۲	۰/۹۹۸۴۸۵

جدول ۳: خطای اندازه، خطای فاز و TCFها را حین تست آلودگی برای OVT ۳۴۵ کیلوولت

شکل ۵، اندازه‌های ولتاژ و میدان الکتریکی سنسورهای مجزا برای یک چرخه کامل ۶۰ Hz از ولتاژ اعمالی را در حین تست آلودگی نشان می‌دهد. از شکل ۵ می‌توان دریافت که علی‌رغم تند و تیز بودن و سریع بودن سیگنالهای گذرای سنسورها، سیگنال ولتاژ بسیار نرم بوده، و دقیقاً معادل سیگنال ۶۰ Hz اعمالی می‌باشد. همچنین می‌توان متوجه شد که سیگنال ولتاژ در واقع یک محاسبه سر راست مجموع، می‌باشد؛ و در هر زمان بدون استفاده از تکنیک‌های فیلتری بدست آمده است. پس، شکل ۵، اثرات متقابل استفاده ترکیبی از محافظ‌های مقاوم، برای کم کردن اثرات میدان پارازیتی، و روش تریبلی برای اجتماع عددی میدان جهت حذف اثرات پارازیت میدان روی اندازه‌گیری ولتاژ OVTها را نشان می‌دهد. بعلاوه، شکل ۵، قابلیت سنسورها و بنابراین قابلیت OVTها جهت اندازه‌گیری جرقه‌های سریع را نشان می‌دهد. این فیزیک اثر دیگر پهنای باند بزرگ OVT را نشان می‌دهد، که برای محافظت رله‌ای و کاربردهای پرتوان مهم است.



شکل ۵: OVT، ۳۴۵ KV، (a) میدان الکتریکی و (b) شکل موج ولتاژ در طول تست آلودگی

## B- عایق کاری

طراحی OVT لزوماً به شکل یک عایق ولتاژ بالا با دو الکتروود داخلی ساده نزدیک انتهایش و چند دی الکتریک اضافی و اجزای داخلی مقاومت -بالا می باشد (سنسورها و محافظ). بعلاوه این طراحی از خواص الکتریکی مناسب عایق، بخصوص با توجه به مقاوت HV بهره می گیرد .

OVT، ۱۳۸ KV در معرض تست های ضربه صاعقه تمام موج و مقطعی استاندارد قرار گرفت. هم چون آزمایشات توان - فرکانس مقاومت . موج نور پردازی ضربه یک ولتاژ حداکثر ۰/۵ KV دارد و به ترتیب دارای ابتدا و انتهای ۱/۲ MS و ۵ MS است . ضربه های مقطعی دارای قله ۷۵ KV و قطعات بریده شده در ۳ MS و ۵ MS می باشند . ضربه های موج مقطعی و تمام موج قطبی مثبت و منفی هم ایجاد شدند . ایمپالسهای تمام موج و موج مقطعی OVT، ۳۴۵ KV هم این خصوصیات را دارند به غیر از اینکه قله ولتاژ آنها ۱۳۰۰ KV و ۱۵۰۰ KV است. هر دو OVTها این تست ها را با موفقیت گذراندند ، بدون هیچ نشانه ای از صدمه عایق .

هم چنین OVT، ۳۴۵ KV در معرض ضربه های کلید زنی تحت شرایط مرطوب قرار گرفت . ضربه های کلید زنی دارای تکه های ابتدایی و انتهایی ۲۵۰ ms و ۲۵۰۰ ms هستند و دارای قله ولتاژ مثبت ۲۵۰ KV می باشند . OVT این تست را نیز جواب داد .

ولتاژ ( کیلو ولت )	تخلیه بار جزئی ( pc )	مقدار مورد نیاز در IEC 60044-2
۸۰/۳	<۱	<۵ pc
۸۳/۷	<۱	<۵ pc
۹۲	<۱	<۵ pc
۱۰۰	<۱	<۵ pc
۱۴۵	۱/۸	<۱۰ pc
۱۶۷	۲/۳	-----
۲۲۰	۱۱	-----
۲۲۰	۷/۳	-----
۱۶۷	۳/۲	-----

۱۴۵	۲/۸	<۱۰ pc
۱۰۰	۱/۹	<۵ pc
۹۲	<۱	<۵ pc
۸۳/۷	<۱	<۵ pc
۸۰/۳	<۱	<۵ pc

جدول ۴: آزمایشات تخلیه بار جزئی روی OVT، ۱۳۸ کیلو ولت

بعلاوه OVTها تستهای مقاومت فرکانس - توان را نیز پشت سر گذاشتند. اینها شامل اعمال

$۲۷۵^{KV}$  و  $۵۷۵^{KV}$  در فرکانسهای نامی در حدود یک دقیقه برای OVTهای  $۱۳۸^{KV}$  و  $۳۴۵^{KV}$

میباشند.

در نهایت، آزمایشات تخلیه بار جزئی همچنین روی هر دو OVT انجام گرفت. نتایج در جدول ۴

و ۵ داده شدهاند. OVTها در شرایط مورد نیاز به خوبی عمل می کنند.

ولتاژ ( کیلو ولت )	تخلیه بار جزئی ( pc )	مقدار مورد نیاز در IEC 60044-2
۲۰۹	۰/۷	<۵ pc
۲۵۱	۲/۷	<۵ pc
۳۶۵	۳/۶	<۱۰ pc
۳۶۵	۵/۳	<۱۰ pc
۲۵۱	۴	<۵ pc
۲۰۹	۱/۲	<۵ pc

جدول ۵: آزمایشات تخلیه بار جزئی روی OVT، ۳۴۵ کیلو ولت

## ۳-۷ ترانس اندازه‌گیری ولتاژ فشار قوی نوری توسط تداخل نسبی نور سفید

### ۱-۳-۷ مقدمه

یک روش جدیدی که برای اندازه‌گیری پتانسیل در سطوح ولتاژ بالا اجرا می‌شود، استفاده از سنسورهای الکترونوری پاکلز است که در اینجا معرفی می‌شود.

این مبحث یک کاربرد تکنولوژی تداخل سنجی نور سفید را در سیستم اندازه‌گیری ولتاژ بالا با فیبر نوری را ارائه می‌دهد. در این سیستم اطلاعات در طیف نور کدگذاری می‌شوند، اندازه‌گیری‌های مجاز مستقل از قدرت نوری منتقل شده به وسیله اتصال فیبر نوری می‌باشد. یک دستگاه نمونه ساخته شده و در زیر تحریک a.c. با ولتاژ بالاتر از  $60\text{KV}$  در فرکانس  $60\text{HZ}$  تست شد و دستگاه پاسخ خوبی از خود نشان داد و این روش را انجام پذیر دانست.

برای اندازه‌گیری‌های فشار قوی از ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا الکترومغناطیسی و در بعضی حالات از مقسم‌های خازنی و مقاومتی استفاده می‌شد.

استفاده از تکنولوژی جدید که اخیراً توسعه یافته، پیشنهادهایی را نسبت به VT‌های معمولی مطرح می‌کند که در این پیشنهادها تصحیحی انجام شده است که نسبت به مزاحمت‌ها و تداخل‌های الکترومغناطیسی حساس نباشد و پاسخ فرکانس پهن تری داشته باشد و موارد دیگر.

دو حالت سنسورهای فشار قوی الکترونوری در اینجا پیشنهاد می‌شود: یکی سنسور چند لایه و دیگری سنسور پاکلز کریستال تک میکرو است. گرچه سنسور چند لایه حساسیت کافی را برای اندازه‌گیری‌های بالای  $400\text{KV}$  از خود نشان می‌دهد، مولفه‌های نوسانی فرمان گرفته شده در قسمت

انتهای سیگنال از اندازه‌گیری ولتاژهای جرعه ضربه به دست می‌آید. مانند یک پدیده که به ترکیب آثار پیزو الکتریک و الاستوپتیک (Elastooptik) نسبت داده می‌شود. تا زمانی که رنج فرکانس نوسانی وابسته به ابعاد کریستال است این احتمال دارد که از اثر این پدیده بر روی سیگنال اندازه‌گیری شده با تغییر شکل کریستال اجتناب کنیم. سنسور نوری استفاده کننده از کریستال میکروسیگنال پاکلز که کریستالی است با شکل لوله بلند و نازک و برای غلبه بر اثر سیگنال‌های متناوب و تحقق یافتن یک سنسور نوری فشار قوی با پهنای باند پهن dc تا فرکانس بالا گسترش یافته‌اند. گرچه ماکزیمم ولتاژ قابل اندازه‌گیری در یک نوع از این سنسورها محدود می‌شود به کمتر از  $80 \text{KV}$  که این عدد ولتاژ نیم موج ( $V_{\pi}$ ) این سنسور است. مضافاً تا زمانی که سلول پاکلز استفاده شده همانند یک تداخل سنج به نظر می‌رسد، ولتاژ اندازه‌گیری شده در شدت نور خروجی خودش تعریف می‌شود بنابراین، اندازه‌گیری وابسته به انتهای در اتصال (Link) می‌شود که می‌تواند به شکل کاملاً تصادفی تغییر کند.

### ۷-۳-۲ سنسور پاکلز فشار قوی و ترانسفورماتور ولتاژ نوری بر پایه سیستم WLI

پدیده الکترو نوری خطی شناخته شده مانند پدیده پاکلز به طور وسیع برای ساختن مدوله کننده‌هایی که هسته سنسورهای نوری فشار قوی هستند، استفاده شده است. سنسور پاکلز Polarimetric که در شکل طولی فعالیت می‌کند توسعه پیدا کرد که تا افت ولتاژهای بالاتر از  $70 \text{KV}$  را اندازه‌گیری کند. در آخرین پیشرفت‌ها، این سنسورهای فشار قوی همانند تداخل سنج با سنسور ۲ بار منکسر کننده (Birefringent) در سیستم سنسور WLI استفاده می‌شود که قسمت اصلی یک ترانسفورماتور فشار قوی نوری است. این موارد در ادامه توضیح داده می‌شود.

الف- مدولاتورهای الکترونوری در تنظیمات طولی

ضریب انکسار بعضی مواد هنگام اعمال میدان الکتریکی روی آنها تغییر می‌یابد. که این پدیده، الکترونوری است. می‌توان یک ضریب انکسار را توسط سری توانی به کار گیری میدان الکتریکی  $E$  به صورت زیر نشان داد :

$$n = n_0 + rE + SE^2 + \dots \quad (1)$$

که در آن  $n_0$  ضریب انکسار عادی ماده بدون اعمال میدان الکتریکی است و  $r$  و  $S$  ضرایب تأثیر پدیده الکترونوری هستند. عبارت دوم در طرف راست (۱) یک وابستگی خطی به میدان الکتریکی را نشان می‌دهد که این وابستگی بر اثر Pockels بستگی دارد، و عبارت سوم یک وابستگی مجذوروی به اثر Kerr را نشان می‌دهد. در مدولاتورهای نوری میدان الکتریکی اعمالی و جهت‌های اشعه نوری می‌توانند موازی یا عمود نسبت به هم باشد. این دو مورد به ترتیب، مدولاتورهای طولی و مورب نام دارند. برای یک مدولاتور قطبی در تنظیمات طولی، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، به همراه قطبی ساز و آنالیزگر که جهت قطبی سازی‌شان نسبت به هم متقاطع است، تأخیر فاز القایی،  $\Gamma$ ، بین دو نور مورب بدین ترتیب است :

$$\Gamma = (2\pi/\lambda)\Delta n \times L \quad (2)$$

که  $\lambda$  طول موج نور،  $\Delta n$  شکست مضاعف القایی و  $L$  طول کریستال است.

شکل ۱: اصل اثر الکترونوری

برای مثال توسط یک کریستال مکعبی شکل در یک مدولاتور طولی، و با در نظر گرفتن

$$V = E \times L$$

شکست مضاعف القایی خواهد بود :



$$\Delta n = n_0^3 r_{41} \frac{V}{L} \quad (۳)$$

که  $n_0$  ضریب شکست عادی و  $r_{41}$  تنها ضریب نسبی الکترونوری کریستال می‌باشد. در این

مورد، ولتاژ نیمه موج، که توسط مقدار  $V$  که در آن  $\Gamma$  به  $\pi$  می‌رسد تعریف شده بدین شکل است :

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{2n^3 \cdot r_{41}} \quad (۴)$$

تأخیر نهایی فاز  $\Gamma_t$ ، مجموع تأخیر فاز القایی الکتریکی  $\Gamma$  با یک تأخیر اضافی  $\phi_r$ ، است که

توسط صفحه تأخیر بوجود می‌آید و بدین شکل است:

$$\Gamma_t = \phi_r + \pi \frac{\theta}{V_n} \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن  $\phi_r = \frac{\pi}{2}$ ، شدت نور گسیل شده  $T$ ، که ضریب بین شدت نور ورودی و

خروجی است، به عنوان تابعی از ولتاژ اعمالی بدین شکل خواهد بود :

$$T = \frac{I_o}{I} = \sin^2 \left[ \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \pi \frac{V(t)}{V_{\pi}} \right] \quad (۶)$$

منحنی پاسخ (ولتاژ اعمالی بر حسب شدت نور خروجی) برای این نوع مدولاتور در شکل ۲ نشان

داده شده است .

شکل ۲ : منحنی پاسخ مدولاتور پاکلز برای ولتاژ سینوسی اعمال شده به کریستال

**ب- سنسورهای پاکلز ولتاژ بالا بر اساس مدولاسیون طولی :**

یک سنسور نوری ولتاژ بالا قبلاً برای استفاده بعنوان بخش اصلی ترانس ولتاژ نوری (OVT)

ساخته شده بود . دیاگرام شماتیک این سنسور در شکل ۳ نشان داده شده است .

شکل ۳: سنسور پاکلز فشار قوی

سنسور ولتاژ بالا (فشار قوی) شامل ترتیبی از یک قطعه بلند از کریستال‌های پاکلز الکترونوری قرار داده شده بین دو الکتروود آلومینیوم که توسط یک لوله acrylic محافظت می‌گردد تشکیل شده است. کریستال الکترو نوری مورد استفاده یک قطعه  $Bi_3Ge_4O_{12}$  (BGO) در شکل لوله موازی بود  $(1 \times 5 \times 100 \text{mm})$ . برای استفاده راحت تر و نیز محافظت مکانیکی آسان تر، این کریستال در یک استوانه acrylic با قطر خارجی  $20 \text{mm}$  و طول  $100 \text{mm}$  قرار داده شد.

در دو انتهای این استوانه، صفحات آلومینیومی گرد شبیه به سکه، توسط چسب نقره‌ای متصل شده‌اند تا بتوانند ارتباط الکتریکی بین صفحات کریستال و الکتروودهای آلومینیومی را فراهم سازند. هر کدام از این صفحات آلومینیومی سوراخی به قطر  $2 \text{mm}$  در مرکز دارد، که اجازه ورود نور به داخل را می‌دهد و بدین ترتیب نور می‌تواند درون کریستال انتشار یابد. بعلاوه: هر صفحه یک فاصله عمیق جهت تعبیه قطبی ساز دارد. برای تکمیل ارتباط فیبر نوری، یک پین ۵ محور که یک کولیماتور بافته شده فیبر نوری را نگه داشته، در انتهای عقب الکتروود قرار می‌گیرد. این کولیماتور در یک لنز درجه‌بندی شده ضریبی ( $GRIN^{16}$ ) قرار دارد که به انتهای یک فیبر نوری تک حالت  $1/5 \text{m}$

بسته شده است و در خروجی خود یک باریکه نور  $0.45\text{mm}$  در نظر و با انحراف  $\pm 0.15$  درجه تولید می‌کند. بعد از تمام مراحل تنظیم، هدر روی کل در این سنسور حدود  $10\text{db}$  است. با بکارگیری یک کریستال BGO، که  $n_o = 2.098$ ،  $r_{41} = 1/03 \times 10^{-k} \left(\frac{m}{V}\right)$  و یک دیود فوق نورافشان ( $\text{SLD}^{17}$ ) که با  $\lambda = 1/321\mu\text{m}$  به عنوان منبع نور در شرایط ولتاژ بالا کار می‌کند، ولتاژ نیمه برج محاسبه شده با بکارگیری معادله ۳ برابر است با:

$$V_{\pi} \cong 69/4 \text{ kv}$$

### ج - تکنیک WLI اعمالی برای سنسورهای پاکلز ولتاژ بالا جهت ساخت یک ترانسفورماتور نوری ولتاژ بالا :

سنسور پاکلز قطبی مذکور دارای این ایراد (سختی) می‌باشد که نسبت به سیگنال نور خروجی به رقیق‌سازی ارتباط فیبر نوری وابسته است.

قبلاً روش‌هایی جهت برطرف کردن این وابستگی پیشنهاد شده بود مثلاً توسط پردازش الکترونیکی سیگنال. در کارها روشی جدید ارائه می‌گردد که در آن تکنیک WLI نقش اصلی را بازی می‌کند. در یک تداخل سنج نور سفید: نور ساطع شده از یک طیف پهن به دو بخش تقسیم می‌گردد، که اجازه دارند در مسیرهای نوری با طول‌های مختلف انتشار یابند. بعد از ترک این دو مسیر، این دو مولفه نور جهت تداخل ترکیب می‌شوند، ولی در صورت بزرگتر بودن اختلاف مسیر نوری ( $\text{OPD}^{18}$ ) از حول چسبندۀ (LC) منبع نور، گفته می‌شود که این دو مولفه هم بسته نبوده و قابلیت رؤیت این تداخل به حدی کم است که قابل تشخیص نمی‌باشد. در این مرحله اطلاعات تداخل سنج تنها در طیف نور رمزگشایی می‌شود.

<sup>17</sup> Super Luminescent Diode

<sup>18</sup> Optical Path Difference

اگر تداخل سنجی که به این شکل ساخته شده (که در آن  $OPD \gg L_C$ ) به عنوان یک سنسور به کار رود، تا بتواند اطلاعات ایجاد شده در طیف نور را بازیابی نماید، ضروری خواهد بود که نور خروجی بتواند از درون یک تداخل سنج دیگر هم عبور کند. در یک چنین تداخل سنج بازیابی: OPD باید مساوی (یا حداقل شبیه و نزدیک به) OPD موجود در تداخل سنج سنسور باشد. در این مورد، سنسور ولتاژ بالای پاکلز را می‌تواند به عنوان یک تداخل سنج با انکسار مضاعف دید که دارای OPD مجموع، یعنی  $\Delta L_s$  زیر می‌باشد:

$$\Delta L_s = \Gamma_t \times \left( \frac{\lambda_o}{2\pi} \right) = \frac{\lambda_o}{2} \frac{V}{V\pi} + \Delta L_{RPS} \quad (7)$$

که  $\Delta L_{RPS}$ ، میزان OPD ثابت ایجاد شده توسط صفحه تأخیر ساز می‌باشد.

از آنجایی که کریستال BGO هیچ انکسار مضاعف ذاتی ندارد، OPD القایی الکتریکی که بین دو مؤلفه قطبی‌سازی بوجود می‌آید، هنگام صفر بودن ولتاژ اعمالی، مساوی صفر خواهد بود. جهت بدست آوردن یک سری تنظیمات WLI، یک صفحه لیتیوم نیوبیت ( $LiNb_3O$ ) بعنوان صفحه تأخیر سازی در سنسور ولتاژ بالا استفاده می‌گردد. چنین ورقه‌ای ضخامت ۱mm داشته و محور x‌های آن موازی جهت انتشار نور بوده و محورهای y و z آن موازی محور x و y کریستال BGO هستند. صفحه تأخیرسازی یک OPD اضافه ثابت،  $\Delta L_{RPS}$  را ایجاد می‌کند که بسیار بزرگتر از تراز  $L_C$  منبع SLD، بین دو مؤلفه قطبی شده مورب در نور نشری است.

به منظور بازیابی سیگنال تداخل سنج، یک تداخل سنج بازیاب ساده، به صورت سری با فیبر نوری در مسیر برگشت سیستم سنسوری نصب شده است. تداخل سنج بازیاب از یک صفحه تأخیر سازی مابین دو قطبی ساز تشکیل شده است. توان نوری در خروجی تداخل سنج بازیاب،  $I_0$  توسط معادله زیر داده می‌شود:

$$I_o = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_R I_i \left\{ 1 + \frac{1}{2} e^{-(\pi \Delta L / L_C)^2} \cos 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda_o} \right\} \quad (8)$$

که در آن  $I_i$  توان نوری در ورودی سیستم (خروجی SLD) و  $\alpha_s$  تضعیف نور از منبع SLD برای خروجی تداخل سنچ حسی،  $\alpha_R$  تضعیف نور از خروجی تداخل سنچ سنسور خروجی،  $\lambda_o$  طول موج مرکزی منبع نور و  $\Delta L$  مجموع OPD در سیستم سنسوری است، که توسط

$$\Delta L = \Delta L_s - \Delta L_{RPt} \text{ داده می‌شود.}$$

صفحه تأخیر سازی مورد استفاده در تداخل سنچ بازتاب مشابه تداخل سنچ مورد استفاده در تداخل سنچ سنسوری است که چه توسط یک پین مخصوص نگه داشته می‌شود که می‌تواند حول دو محور بچرخد تا بتوان OPD ایجاد شده را به خوبی تنظیم کند.

با به کار گیری قابلیت چرخش این دو محور، قادر خواهیم بود که OPD را در تداخل سنچ بازتاب طوری تنظیم نمائیم که:  $\Delta L_{RPt} = \Delta L_{RPs} - \frac{\lambda_o}{4}$  در چنین شرایطی. از معادله (۸)،  $I_o$  خواهد بود:

$$I_o = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_R I_i \left\{ 1 + \frac{1}{2} e^{-\left[ \frac{\lambda_o}{2} \left( \frac{\pi V}{V_n} - \frac{\pi}{2} \right) / L_c \right]^2} \cos \left( \pi \frac{V}{V_\pi} - \frac{\pi}{2} \right) \right\} \quad (9)$$

از آنجائیکه در کاربردهای عملی،  $L_c$  بسیار بزرگ‌تر از  $\lambda_o$  است، عبارت‌نمایی در (۹) نزدیک به واحد باقی می‌ماند، در حالی که  $|V| < V_\pi$ . بنابراین،  $I_o$  را می‌توان تقریباً بدین شکل بدست آورد:

$$I_o = I_o^- \times \left( 1 + \frac{1}{2} \sin \pi \frac{V}{V_\pi} \right) \quad (10)$$

که  $I_o^- = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_R I_i$  میانگین شدت نور خروجی می‌باشد.

منحنی خروجی را برای این نوع سیستم سنسور، که در شکل ۴ نشان داده شده است، مشابه

منحنی خروجی یک مدولاتور پاکلز قطبی، نشان داده شده در شکل ۲ است.

شکل ۴: منحنی پاسخ سیستم WLI ولتاژ سینوسی

د- ترانسفورماتور ولتاژ بالا نوری با استفاده از تنظیمات WLI

همانطور که قبلاً در مورد سنسور پاکلز قطبی‌سنجی توضیح داده شد، و نیز در مورد سیستم سنسور WLI توضیح دادیم، نوعی وابستگی بین شدت نور خروجی،  $I_0$  (که اندازه‌های ولتاژ اعمالی را منتقل می‌کند) و تضعیف کلی سیستم،  $\alpha_t$  وجود دارد. به منظور بهره بردن از تکنیک WLI و حذف این وابستگی، یک ترانس نوری ولتاژ بالا، طبق شکل (۵) درست شد.

شکل ۵: ترانسفورماتور ولتاژ نوری بر اساس WLI

شدت نور در خروجی تداخل سنج سنسوری،  $I_{os}$  به این شکل است:

$$I_{os} = \frac{1}{2} \alpha_s \cdot I_i \left\{ 1 + e^{-\left(\pi \Delta L_s / L_c\right)^2} \cos 2\pi \frac{\Delta L_s}{\lambda_o} \right\} \quad (11)$$

از آنجائیکه  $\Delta L_s \gg L_c$  عبارت نمایی در (۱۱) به صفر میل می کند . بنابراین ،  $I_s$  به این

مقدار کاهش می یابد :

$$I_{os} = \frac{1}{2} \alpha_s . I_i = \frac{2}{\alpha_R} I_o \quad (۱۲)$$

با قرار دادن یک کوپل فیبر نوری (کوپل  $O.F^{19}$ ) بین خروجی تداخل سنج سنسوری و ورودی

تداخل سنج بازیاب ، می توان مقدار  $I_{os}$  را تشخیص داد که بعداً توسط یک آشکارساز تصویری

(DET.2) آشکار می گردد و جهت تعادل شدت نور در خروجی تداخل سنج بازیاب برای هر گونه

تغییری در تضعیف سازی کلی ،  $\alpha_t$  به کار می رود .

با استفاده از یک کوپل ۳db ، شدت نور ورودی به دو قسمت مساوی بین دو خروجی تقسیم

می گردد . بنابراین شدت نورهایی که به آشکار سازهای تصویری (DET.1) و (DET.2) می رسد ،

خواهد بود : (شکل ۵)

$$I'_o = \alpha_{ex} \frac{I_o}{2} \quad , \quad I'_{os} = \alpha_{ex} \frac{I_{os}}{2} = I_o \frac{\alpha_{ex}}{\alpha_R} \quad (۱۳)$$

که مقدار هدر روی کوپل O.F است .

یک بلوک دیاگرام برای یک پیاده سازی احتمالی واحد پردازش سیگنال الکترونیکی در شکل ۶

نشان داده شده است .

شکل ۶ : بلوک دیاگرام واحد پردازش سیگنال الکترونیکی

در این پیاده‌سازی خاص، ابتدا سیگنال‌های جریان نوری از (DET.1) و (DET.2) (در واقع به ترتیب  $(I_{DET.1})$  و  $(I_{DET.2})$  در ولتاژها (به ترتیب  $V_{D_1}$ ،  $V_{D_2}$ ) توسط آمپلی فایرهای ترانس  $TIA_1$  و  $TIA_2$  انتقال می‌یابند که مقدار دریافتی امیدانس ترانس‌ها به ترتیب  $Z_1$ ،  $Z_2$  هستند.  $V_{D_2}$  به ۲ تقسیم شده و از  $V_{D_1}$  کم می‌شود. سیگنال‌های خروجی بعداً در  $G_2$  ضرب می‌گردد، که سیگنال ولتاژ خروجی را می‌سازد، یعنی  $V_{out}(t)$  پس از پردازش: اگر  $Z_2 = Z_1$  و  $G_2 = \frac{\alpha_R}{2}$  باشد سیگنال خروجی،  $V_{out}(t)$  بدین شکل داده می‌شود:

$$V_{out}(t) = \frac{G_{out}}{2} \cdot \sin \pi \frac{V(t)}{V_{\pi}} \quad (14)$$

که در آن  $G_{out}$  مقدار دریافتی آخرین آمپلی فایر مدار می‌باشد. هم‌چنین سیگنال خروجی، یعنی  $V_{out}(t)$  که یک تابع سینوسی ولتاژ اعمالی به تداخل سنج سنسور فشار قوی می‌باشد. (یعنی تابع  $V(t)$ ) می‌تواند خطی گردد (توسط یک روش آنالوگ یا دیجیتال) یا می‌توان آن را توسط تابع خطی سازی زیر بدست آورد:

$$V_{out}(t) \cong \frac{G_{out}}{2} \pi \frac{V(t)}{V_{\pi}} \quad (15)$$

که در حالت  $V(t) \ll V_{\pi}$  قابل قبول است.

#### ۴-۷ نتایج تجربی

ترانس ولتاژ بالای نوری توضیح داده شده برای ولتاژ a.c اعمالی تا  $60 \text{ kV}$  موثر، آزمایش گردید. یک چنین ولتاژی از یک ترانس ثانویه معمولی  $138 \text{ kV}$  به دست آمد. این ترانس ولتاژ، در قسمت اولیه خود توسط یک ترانس خروجی قابل تنظیم اندازه (واریاک) ایجاد گشت که اجازه می‌داد ولتاژ را به طور پیوسته از صفر تا ماکزیمم تغییر دهیم.



یک سیگنال نمونه مشاهده شده در خروجی سیستم،  $V_{out}(t)$  در مقایسه با ولتاژ اعمالی  $V(t)$  در شکل (۷) نشان داده شده است. که در آن ولتاژ اعمالی،  $V(t)$  توسط یک آشکارساز ولتاژ بالای Tektronix (Mod. P6015-A) که به طور مستقیم به نوسان سنج متصل بود، اندازه‌گیری می‌گردید. با به کارگیری این آشکارساز، مقایسه بین موج‌های دو سیگنال به  $20^{Kv}$  محدود شد زیرا این مقدار، بیشترین ولتاژ قابل قبول آشکارسازی می‌باشد. برای مقادیر بالاتر ولتاژ اعمالی، این مقایسه توسط اعمال ولتاژ اولیه توسط واریاک به ترانس انجام گرفت.

شکل ۷: سیگنالهای ولتاژ حاصل شده از آزمایش (a) ولتاژ اعمالی (b) ولتاژ خروجی OVT

برای به دست آوردن دامنه نوسان  $V_{out}(t)$  نشان داده شده در شکل (۷)  $G_{out}$  به این مقدار تنظیم گشت:

$$G_{out} = \frac{V_{\pi}}{500\pi} \approx 44/2 \quad (16)$$

ضریب تبدیل ترانس ولتاژ نوری چنین به دست می‌آید:

$$V(t) = K.V_{out} \quad (17)$$

با قرار دادن  $G_{out}$  به مقدار داده شده در (۱۶)، ضریب تبدیل  $K = 1000$  می‌گردد این مقدار بالایی می‌باشد و همواره کاربرد نخواهد داشت. برای دامنه‌نوسان‌های بالاتر ولتاژ اعمالی،  $K = 1000$  قرار گرفت.

با قرار دادن یک هد ورودی در ارتباط فیبر نوری، سیگنال خروجی  $V_{out}(t)$ ، برای مقادیر متفاوت شدت نور خروجی  $I_0$ ، اندازه‌گیری شد. تأثیر سطح  $I_0$  بر  $V_{out}(t)$  کوچک باقی ماند. یک تغییر ۳dB در شدت نور، کم‌تر از ۱٪ تغییر در نوسان  $V_{out}(t)$  را القا کرد.

## ۷-۵ نتیجه‌گیری

این مبحث کاربردی از روش WLI جهت کسب اطلاع از ترانس ولتاژ نوری را که با سنسور ولتاژ بالای پاکلز ساخته شده بود ارائه نمود. این روش توانست با موفقیت وابستگی بین ولتاژ اندازه‌گیری شده، و شدت نور در فیبر نوری را کاهش دهد. انتقال اطلاعات در طیف نور، امکان کاهش این وابستگی در حداقل ۵۰ مورد را فراهم می‌آورد. به علاوه انتظار می‌رود که اختلالات نوری بوجود آمده در خطوط فیبر نوری، برای مثال، اختلال شدت نور یا قطبی‌سازی نور (پخش نور)، را هم بتوان، توسط یک عملیات فیلتری با به کارگیری این روش پردازش سیگنال کاهش داد.





## ضمیمه ۱: تحلیل ماتریس پلاریزاسیون نور

برای تحلیل یک سیستم نوری که از چندین عنصر نوری تشکیل شده است، استفاده از روش های جبری و قدیمی بسیار سخت و وقت گیر است و روش جدید که تحلیل را ساده تر می کند، روشهای جونز<sup>۲۰</sup> و مولر<sup>۲۱</sup> هستند. در هر دو روش از تحلیل ماتریسی استفاده می شود در این روش ها پرتو نوری ورودی با بردار  $V^o$  نشان داده می شود و از یک ماتریس  $T$  برای توصیف تداخل عنصر نوری با پرتو نور ورودی به آن استفاده می شد و پرتو نور خروجی که با بردار  $V^1$  نشان داده می شود از حاصلضرب ماتریس  $T$  در بردار  $V^o$  بدست می آید.

$$V^1 = TV^o \quad (\text{ض ۱-۱})$$

اگر  $n$  عنصر نوری در سیستم وجود داشته باشد، بردار نوری خروجی برابر می شود با:

$$V^n = T_n T_{n-1} \dots T_1 V^o \quad (\text{ض ۲-۱})$$

### ۱- بردار جونز

یک پرتو نور پلاریزه شده که در راستای محور  $Z$  منتشر می شود را می توان به دو جزء  $E_x$  و  $E_y$

تجزیه کرد.

$$E = iE_x + jE_y \quad (\text{ض ۳-۱})$$

که

$$E_x = a \cos(\omega t - kz) = a \cos \varphi \quad (\text{ض ۴-۱})$$

$$E_y = b \cos(\omega t - kz + \delta) = b \cos(\varphi + \delta) \quad (\text{ض ۵-۱})$$

<sup>۲۰</sup> Jones method

<sup>۲۱</sup> Muller method

در سال ۱۹۴۰، جونز برای نشان دادن این پرتو نور از یک بردار ستونی که عناصر آن دو جزء

$E_x$  و  $E_y$  هستند استفاده کرد .

$$V = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \text{Re} \begin{bmatrix} ae^{j\varphi} \\ be^{j(\varphi+\delta)} \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۶})$$

در معادله بالا می توان علامت Re را حذف کرد و از شکل مختلط آن استفاده کرد .

$$V = \begin{bmatrix} ae^{j\varphi} \\ be^{j(\varphi+\delta)} \end{bmatrix} = e^{j\varphi} \begin{bmatrix} a \\ be^{j\delta} \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۷})$$

متوسط شدت نور پرتو متناسب با مجموع مربعات دامنه دو المان بردار  $V$  است یعنی :

$$I = C(a^2 + b^2) \quad (\text{ض ۱-۸})$$

برای سادگی  $C=1$  فرض می شود . اگر تغییرات زمانی موج مهم نباشد می توان  $e^{j\varphi}$  را از معادله

(ض ۱-۷) حذف کرد و حالت پلاریزاسیون یک پرتو را با بردار جونز نشان داد :

$$J = \begin{bmatrix} a \\ be^{j\delta} \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۹})$$

بنابراین ، برای نمونه نور پلاریزه خطی در راستای محور  $X$  با  $\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$  و نور دایروی راستگرد را

با  $\begin{bmatrix} a \\ ia \end{bmatrix}$  می توان نشان داد .

## ۲- پارامترهای استوکس<sup>۲۲</sup>

نمایش دیگری از نور پلاریزه که نمایش بردار جونز را تکمیل می کند در سال ۱۸۵۲ توسط

استوکس ابداع شد .

او چهار کمیت را معرفی کرد که تنها توابعی از کمیت های قابل مشاهده موج الکترو مغناطیسی

هستند و اکنون پارامترهای استوکس نامیده شده اند . حالت پلاریزاسیون یک پرتو نور را می توان بر

حسب این کمیت‌ها بیان نمود. اکنون معادلات (ض ۱-۳) تا (ض ۱-۶) را در نظر بگیرید. با بکار بردن این عبارتها به روشی ظریف و ساده، پارامترهای استوکس را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$S_1 = a^2 - b^2 \quad (\text{ض ۱-۱۰ ب}) \quad S_0 = a^2 + b^2 \quad (\text{ض ۱-۱۰ الف})$$

$$S_3 = 2ab \sin \delta \quad (\text{ض ۱-۱۰ د}) \quad S_2 = 2ab \cos \delta \quad (\text{ض ۱-۱۰ ج})$$

فقط سه تا از روابط مستقل هستند بطوریکه

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (\text{ض ۱-۱۱})$$

پارامترهای استوکس را می‌توان با آزمایش‌های ساده‌ای تعیین کرد. مجموعه این پارامترها برای یک موج مشخص را می‌توان به صورت یک بردار ستونی نمایش داد. در جدول (ض ۱-۱) بردارهای استوکس و جونز در برخی حالت‌های پلاریزاسیون نمایش داده شده است. (در اینجا این بردارها بصورت سطری نوشته شده‌اند ولی در اصل آنها باید بصورت ستونی باشند) این بردارها نرمالیزه شده‌اند.

بردارهای جونز [J <sub>0</sub> J <sub>1</sub> ]	بردارهای استوکس [S <sub>0</sub> S <sub>1</sub> S <sub>2</sub> S <sub>3</sub> ]	حالت پلاریزاسیون
-----	[1 0 0 0]	غیر پلاریزه

$[1 \ 0]$	$[1 \ 1 \ 0 \ 0]$	خطی ( افقی )
$[0 \ 1]$	$[1 \ -1 \ 0 \ 0]$	خطی ( عمودی )
$\frac{\sqrt{2}}{2}[1 \ 1]$	$[1 \ 0 \ 1 \ 0]$	خطی ( زاویه $45^\circ$ )

جدول (ض ۱-۱) بردارهای استوکس و جونز در برخی از حالت های پلاریزاسیون

### ۳- ماتریسهای جونز

فرض کنید که یک پرتو نور پلاریزه داریم که با بردار جونز مربوطه ،  $E_i$ ، نمایش داده شده است .  $E_i$  از داخل یک عنصر نوری عبور کرده و بصورت یک بردار جدید  $E_i$  متناظر با نور ورودی خارج می شود . این عنصر نوری ،  $E_i$  را به  $E_i$  تبدیل کرده است . این فرآیند را می توان به طریق ریاضی و با استفاده از یک ماتریس  $2 \times 2$  توصیف کرد . فرض کنید  $T$  نمایانگر ماتریس تبدیل عنصر نوری مورد بحث باشد در این صورت :

$$E_i = TE_i \quad (\text{ض ۱-۱۲})$$

که در آن

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۱۳})$$

بنابراین با داشتن بردارهای ورودی و خروجی از عنصر نوری می توان عناصر ماتریس تبدیل  $T$  را بدست آورد . در جدول (ض ۱-۲) ماتریسهای جونز چند عنصر نوری معرفی شده اند .

### ۴- ماتریسهای مولر

در سال ۱۹۴۲، مولر پیش ماتریسی برای پرداختن به بردارهای استوکس ابداع کرد . چون بردارهای استوکس هم در مورد نور پلاریزه شده و هم غیر پلاریزه بکار می روند ، این روش دارای



مزایای بیشتری نسبت به روش جونز است و کاربرد بیشتری نیز دارد و در اصل تکمیل کننده روش جونز است. ماتریس های  $4 \times 4$  مولر به همان روشی که ماتریس های جونز به کار برده می شوند، مورد استفاده قرار می گیرند. در جدول (ض ۱-۲) علاوه بر ماتریسهای جونز، ماتریسهای مولر هم آمده است. البته برای توصیف قطبشگر و تیغه یک چهارم موج، ماتریس های کلی زیر را می توان تعریف کرد:

$$M_{\rho} = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۱۴})$$

$$M_{\frac{\lambda}{4}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\beta & \cos 2\beta \sin 2\beta & -\sin 2\beta \\ 0 & \cos 2\beta \sin 2\beta & \sin^2 2\beta & \cos 2\beta \\ 0 & \sin 2\beta & -\cos 2\beta & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۱۵})$$

که در مورد  $M_{\rho}$ ، ماتریس قطبشگر،  $\theta$  نشان دهنده زاویه محور انتقال قطبشگر با جهت انتشار نور است و در مورد  $M_{\frac{\lambda}{4}}$ ، ماتریس تیغه ربع موج،  $\beta$  معرف زاویه محور تنه تیغه با جهت انتشار نور است.

ماتریس مولر	ماتریس جونز	عنصر نوری
$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	قطبشگر خطی (افقی)

$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	قطبشگر خطی (قائم)
$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	قطبشگر خطی در زاویه $45^\circ$
$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$	قطبشگر خطی در زاویه $-45^\circ$
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$e^{j\frac{\pi}{4}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix}$	تیغه یک چهارم موج با محور تند قائم
$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$	$e^{j\frac{\pi}{4}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix}$	تیغه یک چهارم موج با محور تند افقی

جدول (ض ۱-۲): ماتریسهای جونز و مولر

## ۵- معرفی ماتریسهای فارادی، کروپاکلز

در مبحث مربوط به سیستم های مدولاسیون شدت نور که برای تشخیص اثرات فارادی، کروپاکلز استفاده می شوند، یک سیستمی متشکل از چند عنصر نوری معرفی شد. در این سیستم از المان هایی همچون قطبشگر و تیغه یک چهارم موج بهره برده می شد و نیز سلولهای فارادی، کروپاکلز نقش اصلی این سیستم ها را داشتند. برای تحلیل این سیستم ها با استفاده از روش مولر، احتیاج به ماتریس های مربوط به المانهای استفاده شده است. در این میان، ماتریس های قطبشگر و تیغه یک چهارم موج، در قسمت قبل معرفی شدند و فقط باید ماتریسهای مربوط به سلولها فارادی، کروپاکلز تعریف شوند.

ماتریس توصیف کننده سلول کر بصورت :

$$M_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta_k & -\sin \theta_k \\ 0 & 0 & \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۱۶})$$

تعریف می شود که  $\theta_k$  ، اختلاف فاز ایجاد شده در سلول کر است . اگر در ماتریس  $M_p$  به جای

$\theta_k$  ،  $\theta_p$  قرار داده شود ، ماتریس سلول پاکلز بدست می آید .

همچنین ماتریس توصیف کننده سلول فارادی برابر است با :

$$M_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_f & \sin \theta_f & 0 \\ 0 & -\sin \theta_f & \cos \theta_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ض ۱-۱۷})$$

که  $\theta_f$  زاویه چرخش اثر فارادی است .

ضمیمه ۲: جدول استاندارد ترانسفورماتور ولتاژ

مورد استعمال	جابجایی فاز(دقیقه)	خطای نسبت(٪)	ولتاژ (درصد)	بار (درصد)	کلاس
--------------	--------------------	--------------	--------------	------------	------

۰/۱	۲۵-۱۰۰	۸۰-۱۲۰	۰/۱	۵	آزمایشگاه
۰/۲	۲۵-۱۰۰	۸۰-۱۲۰	۰/۲	۱۰	سنجش دقیق
۳	۲۵-۱۰۰	۸۰-۱۲۰	۳	--	وسایل اندازه‌گیری
۳P ۶P	۲۵-۱۰۰ ۲۵-۱۰۰	۵- $V_f$ ۵- $V_f$	۳ ۳	۱۲۰ ۲۴۰	حفاظت

جدول (ض ۱-۲): کلاس دقت ترانسفورمرهای ولتاژ