

# اثرات اعوجاج کیفیت توان روی محرکه های القایی، عمر ترانسفورماتور و کیفیت محصول در صنایع چوب و کاغذ مازندران

مهدی رادمهر      شاهرخ فرهنگی      سید علی نبوی نیاکی      ایرج یوسفیان  
دانشگاه آزاد اسلامی ساری      دانشگاه تهران      دانشگاه مازندران      صنایع چوب و کاغذ مازندران  
[ivoosef@yahoo.com](mailto:ivoosef@yahoo.com)      [seved@umz.ac.ir](mailto:seved@umz.ac.ir)      [farhangi@ut.ac.ir](mailto:farhangi@ut.ac.ir)      [radmehr@iausari.ac.ir](mailto:radmehr@iausari.ac.ir)

## چکیده

با افزایش کاربرد بارهای غیرخطی، مساله اعوجاج کیفیت توان بحث مهم سالهای اخیر شده است. در صنایع کاغذ سازی بخاطر وجود بارهای غیر خطی بزرگی مانند محرکه های القایی، موضوع کیفیت توان اهمیت بیشتری دارد. در این مقاله اثرات اعوجاج کیفیت توان از جمله کمبود و بیشبود ولتاژ در مجتمع عظیم کاغذسازی صنایع چوب و کاغذ مازندران بررسی خواهد شد و با استفاده از داده های واقعی اندازه گیری شده، اثرات متقابل این حالات گذرا روی رفتار محرکه های القایی خط تولید و کیفیت محصول، مطالعه و تحقیق می شود. همچنین اثرات هارمونیکها روی ترانسفورماتورهای کارخانه مانند افزایش تلفات و کاهش عمر آن تجزیه و تحلیل خواهد شد.

کلمات کلیدی: کیفیت توان، کمبود ولتاژ، صنایع کاغذ سازی، محرکه های القایی، عمر ترانسفورماتور

## ۱- مقدمه

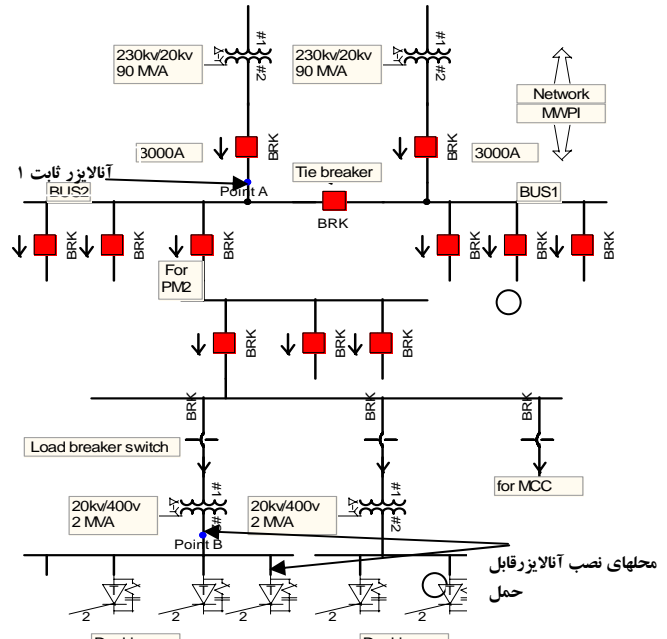
اندازی موتورهای بزرگ ایجاد گردد [4-7]. شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی در مورد محرکه های دور متغیر که کمبود ولتاژ در رفتار محرکه اثرات سویی مانند افزایش جریان دارد [8]. بنابراین یک سیستم مانیتورینگ مناسب برای صنایع کاغذ سازی در جهت کاهش توقفات و افزایش بازده ضروری بنظر می رسد. در این مقاله نتایج حدود یکسال (۱۳۸۴/۱۳۸۳) مطالعه و بررسی در مورد کیفیت توان و اثرات متقابل آن با تجهیزات در مجتمع صنایع چوب و کاغذ مازندران (MWPI) آمده است. در نهایت راه حل مناسب با توجه به توجیه اقتصادی آن ارائه خواهد شد.

اعوجاج در ولتاژ ورودی مانند قطع برق، کمبود ولتاژ، بیشبود ولتاژ، فوران ولتاژ و هارمونیکهای ولتاژ می تواند اثرات سویی در بارهای الکتریکی داشته باشد و باعث کارکرد نامناسب دستگاههای حساس شود. در سیستمهای الکتریکی مدرن، با افزایش بارهای غیرخطی، بحث کیفیت توان اهمیت ویژه ای پیدا کرده است. بارهای غیر خطی که ۱۵ درصد کل بارها در سال ۱۹۸۷ بوده به ۵۰ درصد در سال ۲۰۰۰ رسیده است. خط اصلی تولید در صنایع کاغذسازی به کیفیت بالای ولتاژ ورودی نیاز دارد زیرا تعداد زیادی موتور الکتریکی با هم بطور پیوسته و با سرعت خطی ثابت در حال کار هستند. برای مثال، در کارخانه کاغذ سازی آفریقای جنوبی (SAPPI) کمبود ولتاژ بیشتر از ۲۰ درصد که بیش از ۴۰ میلی ثانیه طول بکشد باعث پارگی کاغذ شده و مدت زیادی طول می کشد تا خط تولید دوباره راه اندازی شود. همچنین در هنگام وقوع کمبود ولتاژ در صورت عدم قطع محرکه های القایی ممکن است فیوزهای قطع سریع یکسوکننده بسوزد [1]. در کارخانه کاغذ سازی calendonian، ۲۳ محرکه القایی dc در ماشین کاغذ سازی با هم کار می کنند و کمبود ولتاژ بیشتر از ۱۰ درصد باعث توقف ماشین کاغذ می شود تا از آسیب دیدن تریتورها جلوگیری کند. قطع ماشین کاغذ سازی معمولاً باعث توقف واحدهای دیگر مانند واحد آماده سازی چوب و خمیر می شود [2]. آخرین آمار در صنایع اروپا نشان می دهد که خسارت ناشی از کیفیت توان نامناسب، سالانه حدود ۱۰ بیلیون یورو می باشد [3]. نوسانات گذرای ولتاژ می تواند در اثر بروز صاعقه، قطع یا وصل بانکهای خازنی، خطای اتصال کوتاه و یا راه

۲- نگاهی اجمالی به صنایع چوب و کاغذ مازندران  
مجتمع چوب و کاغذ مازندران بزرگترین تولید کننده کاغذ از چوب در ایران با ظرفیت ۱۷۵ هزار تن کاغذ در سال (۹۰ هزار تن کاغذ روزنامه، چاپ و تحریر و ۸۵ هزار تن کاغذ مقوای کنگره ای) می باشد. این کارخانه با دیماند برق ۳۵ مگاوات دارای بخشهای تصفیه آب، آماده سازی چوب، آماده سازی خمیر، بازیافت شیمیایی، تولید بخار، تصفیه پساب، ماشین کاغذ ۱، ماشین کاغذ ۲، بسته بندی و آماده سازی کاغذ می باشد. بخشی از نمودار تک خطی کارخانه در شکل ۱ نشان داده شده است. توزیع برق در داخل کارخانه توسط ۴۳ عدد ترانسفورماتور (۳۶ عدد ترانسفورماتور ۲ مگا ولت آمپر ۴۰۰V/۲۰kV، ۵ عدد ترانسفورماتور ۵ مگا ولت آمپر ۶۶۰۰V/۲۰kV، ۲ عدد ترانسفورماتور ۲۰ مگا ولت آمپر ۶۶۰۰V/۲۰kV) انجام می شود. ولتاژ ورودی ۲۰ کیلو ولت توسط یک عدد ترانسفورماتور ۹۰ مگا ولت آمپر ۲۰kV/۲۳۰kV تامین می شود. در سالهای اخیر

مواردی از مشکلات و اغتشاشات مربوط به کیفیت توان در کارخانه گزارش شده است. مهمترین بخش کارخانه کاغذ سازی، قسمت ماشین کاغذ سازی است چون انتهای فرایند کاغذ سازی بوده و چندین موتور با کنترل دور توسط محرکه های القایی بطور پیوسته کار می کنند. محرکه های القایی به کمبود ولتاژ بسیار حساس هستند چون ادوات الکترونیک قدرت در آنها با توجه به ولتاژ ورودی قطع و وصل می گردند (کموتاسیون اجباری) [6, 11].

تعداد ۱۸ عدد محرکه القایی DC در ماشین کاغذ ۲ ( ماشین کاغذ سازی برای تولید کاغذ کنگره ای مقوا ۱۱۳ و ۱۲۷ گرمی) و ۲۲ عدد محرکه القایی DC و ۱۶ عدد محرکه القایی AC با کنترل برداری در ماشین کاغذ ۱ (ماشین کاغذسازی برای تولید کاغذ روزنامه ۴۸ گرمی) وجود دارند. سرعت خطی نامی در خط ماشین کاغذ ۱ برابر ۱۰۰۰ متر در دقیقه و در ماشین کاغذ ۲ برابر ۶۰۰ متر در دقیقه می باشد. هر یک از موتورهای DC در خط ماشین کاغذ توسط یک محرکه القایی ساخت شرکت ABB با مدار پردازنده میکروکنترلی با دقت ۰.۰۱٪ کنترل می شود. مجموعه محرکه ها توسط یک سیستم کنترل مرکزی میکرو پروسوسوری به نام مسترپیس کنترل می شود.



شکل ۱- قسمتی از نمودار تک خطی کارخانه و محل نصب آنالایزر ها ثابت و قابل حمل

خسارت ناشی از توقف تولید ناشی از کمبود ولتاژ حدود ۲ میلیون ریال در هر دقیقه می باشد. بنابراین هر توقف، حدود ۲۰۰ میلیون ریال خسارت بهمراه خواهد داشت که این خسارتهای بعلاوه زمان زیادی است که صرف تمییز کاری خط تولید بعد از توقف تولید خواهد شد. البته میزان خسارت مذکور به شرطی است که هیچ وسیله دیگری در اثر کمبود ولتاژ معیوب نشود.

### ۳- اندازه گیری پارامترهای کیفیت توان

دو دستگاه آنالایزر کیفیت توان ساخت شرکت بهینه نیروی اسپادان برای بررسی پارامترهای مهم کیفیت توان استفاده گردید. یکی از آنها بصورت ثابت در ورودی ۲۰ کیلو ولت کارخانه (نقطه A در شکل ۱) و دیگری که آنالایزر قابل حمل بوده، در ورودی برق محرکه های القایی ماشین کاغذ سازی (نقطه B در شکل ۱) نصب گردید. در نقطه A بعلاوه آنکه فقط دو عدد PT برای اندازه گیری ولتاژ وجود داشت، فقط ولتاژ دو فاز از سه فاز قابل اندازه گیری بود. نرخ نمونه برداری این آنالایزر، ۷۰۰۰ نمونه در ثانیه (۱۴۰ نمونه در هر سیکل) بوده و با استفاده از پورت سریال RS232 و نرم افزار LabView نمونه های ولتاژ و جریان ذخیره شده در حافظه آنالایزر به کامپیوتر منتقل می شد. کمتهایی مانند اعوجاج هارمونیک (THD)، ضریب توان، هارمونیکها، توان اکتیو و راکتیو، دیمانند، کمبود و بیشبود ولتاژ توسط نرم افزار محاسبه می شد. در مواقع بروز خطای کمبود، بیشبود و اضافه جریان، ۲۰ سیکل شکل موج لحظه وقوع خطا (ده سیکل قبل و ده سیکل بعد از وقوع خطا) در آنالایزر جهت تجزیه و تحلیلهای بعدی ذخیره می شد. آستانه خطای کمبود ولتاژ، ۱۸ کیلو ولت و ۲۱۰ ولت بترتیب برای آنالایزر ثابت و قابل حمل تعیین گردید. آستانه خطای بیشبود ولتاژ بترتیب، ۲۲ کیلو ولت و ۲۵۰ ولت و آستانه خطای اضافه جریان بترتیب ۳۰۰۰ آمپر و ۱۰۰۰ آمپر تنظیم گردید.

### ۴- تجزیه و تحلیل داده ها

با بررسی کیفیت توان کارخانه کاغذ سازی صنایع چوب و کاغذ مازندران در طی حدود یکسال (۸۳/۸۴)، ۷۷ مورد کمبود ولتاژ و سه مورد بیشبود ولتاژ اتفاق افتاد که ۱۶ مورد آن منجر به توقف تولید بعلاوه کاهش ولتاژ گردید. جزئیات مربوط به کمبود ولتاژها در سه ماه اول در جدول ۱ نشان داده شده است. ولتاژ نامی هر فاز نسبت به زمین ۲۳۰ ولت می باشد. مطابق جدول ۱، در سه مورد از ده مورد (ردیفهای با رنگ تیره تر) باعث توقف تولید شده است. مثلاً در مورد ۶، ماشین کاغذ ۱ حدود ۸۶ دقیقه و ماشین کاغذ ۲، حدود ۳۹ دقیقه متوقف شده بود. شکل موجهای ولتاژ و جریانهای در این مورد کمبود ولتاژ که توسط آنالایزر ثابت گرفته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل موجها نشان می دهند که علت کاهش ولتاژ، افزایش ناگهانی جریان یکی از فازهای ورودی کارخانه (Is) بوده است که در نتیجه اتصالی در داخل کارخانه بود لذا عامل بروز این کمبود ولتاژ، خود کارخانه می باشد. اتصال کوتاه در خطوط هوایی برق شهرکهها که توسط یکی از ترانسفورماتورهای کارخانه تغذیه می شد باعث بروز این کمبود ولتاژ شد. شکل موجهای ثبت شده توسط آنالایزر قابل حمل در همان مورد ۶ در شکل ۴ نشان داده شده است. با مقایسه شکلهای ۳ و ۴ نتیجه می گیریم که بروز کمبود ولتاژ در ورودی ۲۰ کیلو ولت کارخانه، اثر مشابهی را روی ولتاژ ۴۰۰ ولت تغذیه محرکه های القایی داشته است. در این مورد افزایش جریان ورودی محرکه های dc را می توان در شکل ۴ ملاحظه نمود. کمبود ولتاژ مورد شماره ۷ در جدول ۱ باعث توقف تنها دو بخش ابتدایی ماشین کاغذ سازی (بخش وایر و

$$I_{2-R} = \frac{P(KVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{2-N}} \quad (4)$$

$$P_{I^2R-R} = 1.5[(I_{1-R})^2 R_1 + (I_{2-R})^2 R_2] \quad (5)$$

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - P_{I^2R-R} \quad (6)$$

$I_{1-R}$ : مقدار موثر جریان خط طرف فشار قوی در بار نامی (آمپر)

$I_{2-R}$ : مقدار موثر جریان خط طرف فشار ضعیف نامی (آمپر)

$V_{1-N}$ : مقدار موثر ولتاژ خط طرف فشار قوی در بار نامی (ولت)

$V_{2-N}$ : مقدار موثر ولتاژ خط طرف فشار ضعیف در بار نامی (ولت)

$P(KVA)$ : توان ظاهری ترانسفورماتور

$R_1$ : مقاومت اندازه گیری شده بین دو پایانه فشار قوی (اهم)

$R_2$ : مقاومت اندازه گیری شده بین دو پایانه فشار ضعیف (اهم)

$P_{I^2R-R}$ : تلفات تحت شرایط نامی (وات)

$P_{LL-R}$ : تلفات بار نامی (وات)

$P_{TSL-R}$ : کل تلفات سرگردان تحت شرایط نامی

$P_{NL-R}$ : تلفات بی باری تحت شرایط نامی

برای ترانسفورماتورهای ONAN تلفات ادی حدود ۰,۳۳ برابر کل تلفات سرگردان فرض می شود.

$$P_{EC-R} = 0.33P_{TSL-R} \quad (7)$$

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} \quad (8)$$

$P_{EC-R}$ : تلفات جریان ادی روی سیم پیچی شرایط نامی (وات)

$P_{OSL-R}$ : سایر تلفات سرگردان تحت شرایط نامی (وات)

در صورت وجود هارمونیک در جریان ترانس، تلفات ادی با

ضریب  $F_{HL}$  و سایر تلفات سرگردان با ضریب  $F_{HL-STR}$  افزایش می یابد. این ضرایب با معادلات (۱۰) و (۱۱) قابل محاسبه هستند. [14]

$$P_{LL} = P_{I^2R-R} + F_{HL} \cdot P_{EC-R} + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R} \quad (9)$$

$P_{LL}$ : تلفات بار (وات)

$F_{HL}$ : فاکتور تلفات هارمونیک برای جریان ادی سیم پیچی

$F_{HL-STR}$ : فاکتور تلفات هارمونیک برای سایر تلفات سرگردان

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h \max} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h \max} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (10)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h \max} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h \max} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (11)$$

$$P_{LL}(pu) = P_{LL-R}^2(pu) \cdot \sum_{h=1}^{h=h \max} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (12)$$

$$P_{EC-R}(pu) = \frac{2.8P_{EC-R}}{1.5(I_{2-R})^2 R_2} \quad (13)$$

پرس) شده و ضمناً در اثر این حادثه یک کارت الکترونیکی مربوط به محرکه القایی در قسمت پرس به ارزش حدود صد میلیون ریال معیوب گردید. در این مورد کمبود ولتاژ از طرف برق ورودی از شبکه منشاء کمبود ولتاژ بود. آستانه خطای کاهش ولتاژ محرکه های القایی DC در این کارخانه ۸۵٪ ولتاژ نامی و بمدت ۱ میلی ثانیه است. بنابراین کمبود ولتاژ ۸۰,۹٪ و مدت زمان ۶۰ میلی ثانیه (مورد ۶ در جدول ۱) باعث توقف محرکه در اثر خطای کاهش ولتاژ می شود. بنابراین با مشاهده شکل موجهای لحظه وقوع کمبود ولتاژ می توان براحتی منشاء آنرا تشخیص داد و مقصر اصلی را تعیین کرد [12, 13].

جدول ۱- گزارش کمبود و بیشبود ولتاژ در طی سه ماه اسفند ۸۲، فروردین

و اردیبهشت ۸۳

مدت	درصد نامی	ولتاژ	زمان و تاریخ	فاز	ردیف
40ms	87.6	201.48	11:46:56 6/3/2004	v1	1
50ms	87.6	201.48	12:36:41 24/3/2004	v3	2
60ms	86.8	199.64	17:59:56 28/3/2004	v3	3
50ms	88.9	204.36	12:24:49 29/3/2004	v3	4
30ms	88.8	204.13	12:11:09 30/3/2004	v3	5
60ms	80.9	186.07	18:59:56 26/4/2004	v1	6
70ms	83.1	191.13	16:51:59 5/5/2004	v3	7
350ms	88.6	203.78	23:15:00 12/5/2004	v1,v2,v3	8
60ms	152.2	350.06	14:36:32 13/5/2004	v3	9
60ms	57.6	132.48	13:56:37 5/6/2004	v3	10

#### ۵- تلفات ترانسفورماتور در اثر هارمونیکها

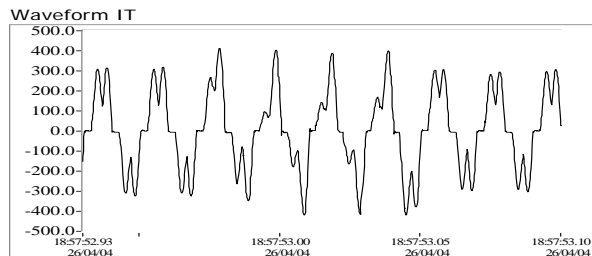
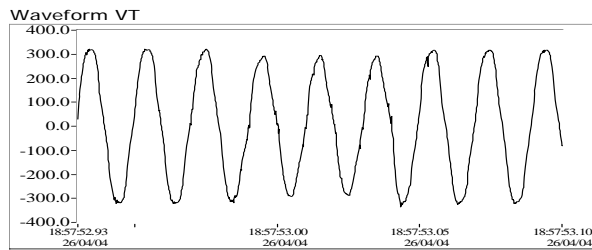
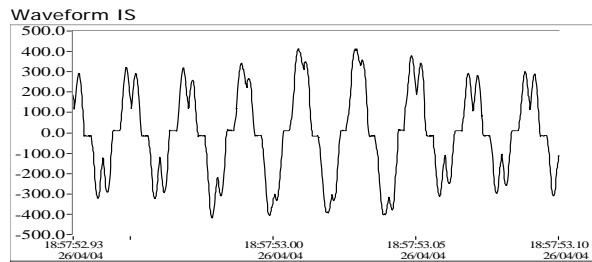
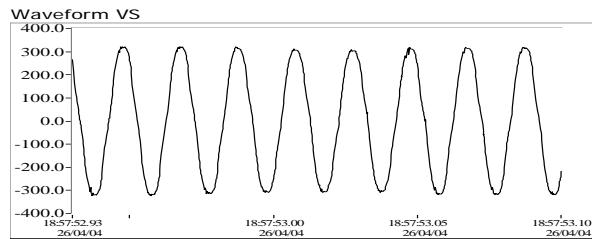
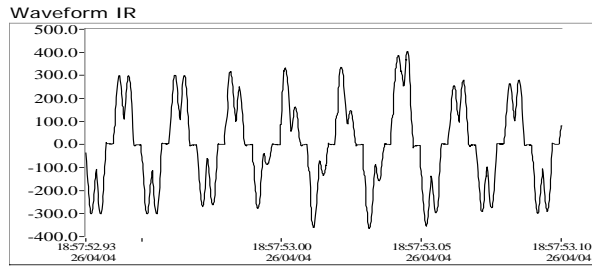
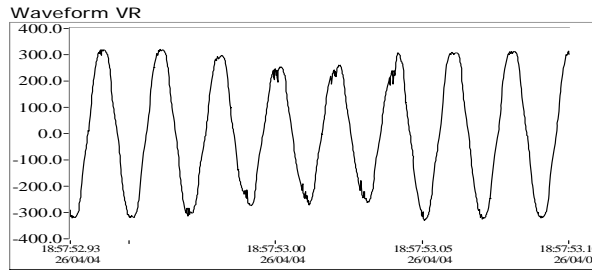
تلفات در ترانسفورماتور شامل تلفات بی باری ( $P_{NL-R}$ ) و تلفات باباری ( $P_{LL-R}$ ) می شود. تلفات باباری شامل تلفات مسی ( $I^2R$ )، تلفات جریان ادی ( $P_{EC-R}$ ) و تلفات پراکندگی ( $P_{OSL-R}$ ) می باشد.

$$P_{TOTAL} = P_{NL-R} + P_{LL-R} \quad (1)$$

$$P_{LL-R} = P_{I^2R-R} + P_{EC-R} + P_{OSL-R} \quad (2)$$

هارمونیکهای جریان باعث افزایش تلفات باباری ترانسفورماتور می شود. بنابراین معادلات تلفات با باری باید با توجه به حضور هارمونیکها باید تغییر یابند. برای ترانسفورماتورهای ONAN تلفات باباری با معادلات زیر تعیین می شوند [14, 15].

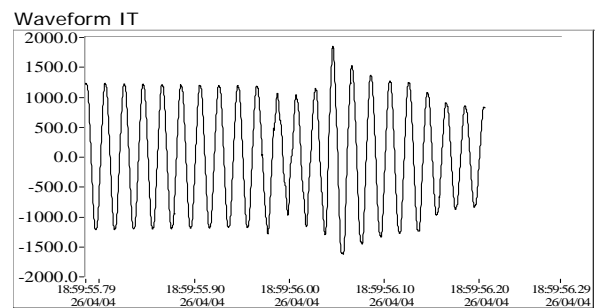
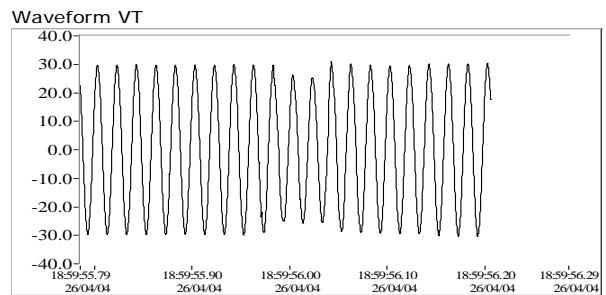
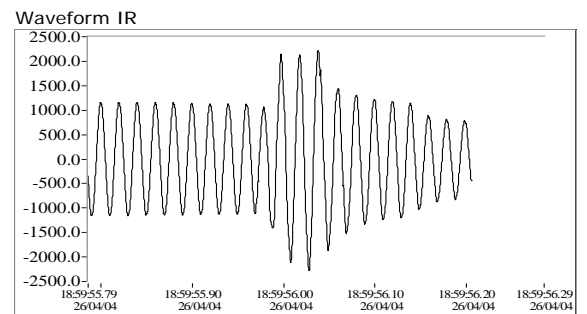
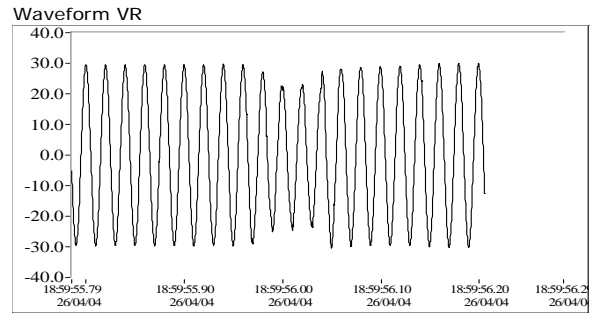
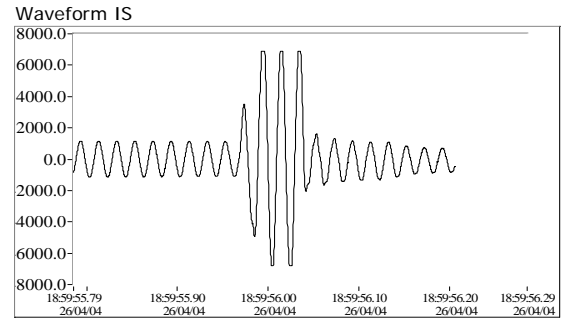
$$I_{1-R} = \frac{P(KVA)}{\sqrt{3} \cdot V_{1-N}} \quad (3)$$



شکل ۴- جریانها و ولتاژهای ورودی ۲۳۰ ولت ورودی محرکه ها هنگام

کمیود ولتاژ شماره ۶ در جدول ۱

### مرتبه هارمونیک h:



شکل ۳- جریانها و ولتاژهای ورودی ۲۰ کیلو ولت کارخانه هنگام بروز

کمیود ولتاژ شماره ۶ در جدول ۱

ترانسفورماتور محاسبه گردید تا تاثیر هارمونیکها بر عمر ترانسفورماتور بررسی گردد.

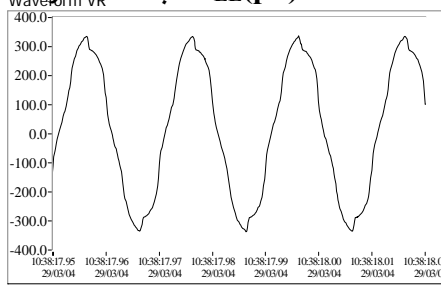
جدول ۲ مشخصات ترانسفورماتور تغذیه محرکه های dc بخش pm2-wet end را نشان می دهد. با استفاده از روابط ذکر شده فاکتورهای تلفات جریان ادی و تلفات پراکندگی برای شکل موج جریان شکل ۶ مطابق زیر محاسبه گردید:

$$F_{HL}=9.4776 \text{ با استفاده از معادله (10)}$$

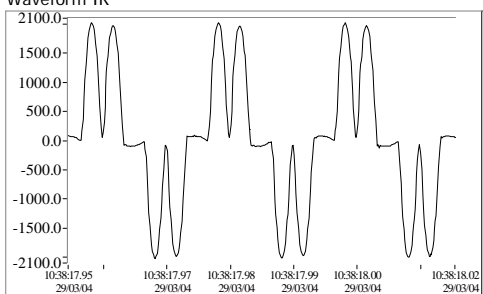
$$F_{HL-STR}=1.77558 \text{ با استفاده از معادله (11)}$$

با توجه به اینکه مقدار بار ترانس مورد بررسی ۰.۵ پریونیت است، تلفات با باری ترانسفورماتور با استفاده از معادله (۱۲) مطابق زیر بدست می آید:

$$P_{LL}(pu)=0.34083 \text{ با استفاده از معادله (12)}$$



شکل ۵- ولتاژ یک فاز ورودی محرکه در ماشین کاغذ سازی



شکل ۶- جریان یک فاز ورودی محرکه در ماشین کاغذ سازی

تلفات ترانسفورماتور با استفاده از روابط (۳) تا (۸) محاسبه شده و با توجه به وجود هارمونیکها و اعمال ضرایب تلفات ادی و پراکندگی در جدول ۳ آمده است. با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۷) ضریب پیری ترانسفورماتور و کاهش عمر آن مطابق زیر بدست می آیند.

$$F_{AA}=0.063$$

$$LOL=0.00084$$

جدول ۲- مشخصات ترانسهای تغذیه محرکه های

تلفات بی باری	3200 W
تلفات بار	23000 W
توان ظاهری	2000 KVA
ولتاژ اولیه	20000 V
ولتاژ ثانویه	400 V
مقاومت اولیه	1.52 ohm
مقاومت ثانویه	0.00064 ohm
ازدیاد دمای روغن	60°C

بزرگترین مرتبه هارمونیک ( $h_{max}=25$ )

مقدار موثر جریان هارمونیک اول:  $I_1$

برای نمایش دادن پریونیت بودن کمیت هاست: (pu)

۶- اثرات محرکه های القایی بر تلفات ترانسفورماتور

عمر مفید ترانسفورماتور به عمر عایقی آن بستگی دارد. عمر عایقی به شرایط حرارتی، مکانیکی و شیمیایی بستگی دارد. اثرات حرارتی از بقیه بیشتر است [16-18] بنابراین عمر ترانسفورماتور معمولاً بصورت تابعی از دمای نقطه داغ ترانسفورماتور در نظر گرفته می شود. معادله عمر ترانسفورماتور با فرض دمای متوسط ۶۵ درجه دمای سیم پیچی بوسیله معادله زیر تعریف می شود:

$$Life (pu) = 9.8 \times 10^{-18} e^{\left(\frac{15000}{\theta_H + 273}\right)} \quad (14)$$

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \left( \frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0.8} \quad (15)$$

$$\theta_g = \theta_{g-R} \left( \frac{1 + F_{HL} P_{EC-R}(pu)}{1 + P_{EC-R}(pu)} \cdot P_{LL}(pu) \right)^{0.8} \quad (16)$$

$$\theta_H = \theta_{TO} + \theta_g + \theta_A \quad (17)$$

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273}\right) \quad (18)$$

$$\%LOL = \frac{F_{AA} \times t \times 100}{Normal\_Insulation\_Life} \quad (19)$$

$\theta_{TO}$ : ازدیاد دمای سطح روغن نسبت به دمای محیط

$\theta_{TO-R}$ : ازدیاد دمای سطح روغن نسبت به دمای محیط

$\theta_g$ : ازدیاد دمای نقطه داغ هادی نسبت به دمای سطح روغن

$\theta_{g-R}$ : ازدیاد دمای نقطه داغ هادی نسبت به دمای سطح روغن

$\theta_A$ : دمای محیط

$\theta_H$ : دمای نقطه داغ سیم پیچی

$F_{AA}$ : ضریب شدت پیری

$\%LOL$ : درصد تلفات عمر ترانسفورماتور

$t$ : فاصله زمانی

در این روش ابتدا ضریب پیری ( $F_{AA}$ ) محاسبه شده و با توجه به معادلات بالا مقدار تلفات ترانسفورماتور و عمر مفید آن تخمین زده می شود. عمر واقعی یک ترانسفورماتور توزیع روغنی با متوسط دمای سیم پیچ ۶۵ درجه حدود ۱۸۰۰۰ ساعت (۲۰،۵۵ سال) مطابق با معادله (۱۴) فرض می شود [19, 20]. بخش ماشین کاغذ سازی در صنایع چوب و کاغذ مازندران نسبت به سایر قسمتها دارای محرکه های بیشتری است (۹۸٪ کل محرکه های مجتمع). جمعاًشش عدد ترانسفورماتور 20kV/400V با ظرفیت ۲ مگاوات آمپر برای تغذیه محرکه های القایی ماشین کاغذ سازی بکار می رود (۴ عدد برای PM1 و ۲ عدد برای PM2). شکل ۵ و ۶ بترتیب ولتاژ و جریان یک فاز محرکه را در قسمت PM2 نشان می دهد. فاکتور تلفات جریان ادی و تلفات پراکندگی برای هر شش

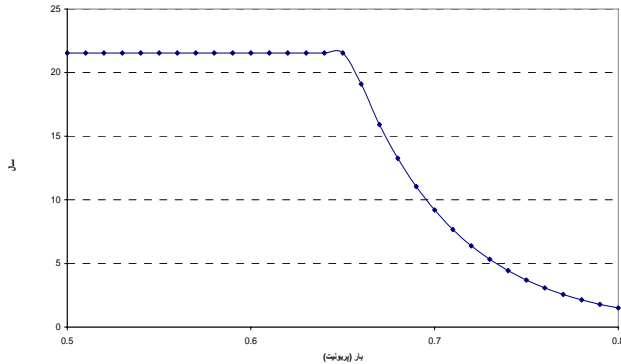
ازدیاد دمای سیم پیچی **65°C**  
دمای محیط **40°C**

جدول ۳- تلفات ترانس با اعمال ضرایب  $F_{HL-STR}$  و  $F_{HL}$

ل تلفات با اعم	ضریب تلفات	تلفات بار	تلفات نامی	نوع تلفات
3200		3200	3200	No load
5317		5317	15600	$I^2R$
7888.3	9.47760161	832.3	2442	winding eddy
3000.5	1.775580577	1689.8	4958	other stray
19405.8		11039.1	26200	Total losses

سیستمهای **servo stabilizer** که به چند سیکل می رسد، از آن صرف نظر شده است.  
۲- بررسی در مورد امکان استفاده از **servo stabilizer** بعلاوه فیلترهای پسیو در خروجی، جهت تثبیت ولتاژ که بعلت بالا بودن توان مصرف کننده (حدود ۱،۲ مگا ولت آمپر)، سیستمهای مورد نظر در این توانها بسیار جاگیر و گران قیمت می شوند و از اطمینان مورد نیاز در تصحیح حالات گذرای شبکه برخوردار نیستند.

عمر واقعی ترانسفورماتور با هارمونیک جریان



شکل ۷- عمر واقعی ترانسفورماتور تغذیه محرکه های القایی بر حسب پریونیت بار

جدول ۴- محاسبه ضریب پیری و درصد کاهش عمر ترانسهای تغذیه محرکه های **dc** در ماشین کاغذ

بخشهای مختلف ماشین کاغذ	ضریب $F_{HL}$	ضریب $F_{HL-STR}$	درصد بار	ضریب پیری ( $F_{AA}$ )	درصد کاهش عمر ترانس (LOL%)
PM1-Wire	4.47	1.34	0.58	0.0676	0.0009
PM1-Press	5.55	1.42	0.65	0.2705	0.0036
PM1-Dryer	9.91	1.82	0.4	0.0463	0.0006
PM1-Reel	1.65	1.02	0.4	0.0041	0.0001
PM2-Wet end	9.48	1.78	0.5	0.1968	0.0026
PM2-Dry end	5.13	1.4	0.48	0.0268	0.0004
incoming 20 KV	1.01	1	0.35	0.0002	0.000002

۳- بررسی امکان استفاده از **Online UPS** جهت تثبیت ولتاژ، از آنجاییکه حالتی گذرای شبکه کارخانه کاغذسازی کوتاه مدت هستند، استفاده از **UPS** جهت تثبیت ولتاژ در این شرایط بسیار فراتر از استاندارد و گرانقیمت خواهد بود.

با توجه به اینکه مقدار ضریب پیری ترانسفورماتور کمتر از یک شده است بنابراین هارمونیکهای موجود با توجه به بار کم ترانسفورماتور باعث کاهش عمر آن نخواهد شد ولی اگر بار این ترانسفورماتور به ۰،۷ پریونیت افزایش یابد، مقدار ضریب پیری آن ۲،۳۴ خواهد شد در نتیجه عمر آن حدود ۸،۷۸ سال تخمین زده می شود. منحنی عمر واقعی این ترانسفورماتور بر حسب پریونیت بار و با فرض دمای محیط ۳۰ درجه در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق این شکل با داشتن هارمونیک جریان، تا بار ۰،۶۵ پریونیت، عمر ترانسفورماتور در اثر هارمونیکها کم نخواهد شد ولی بعد از بار ۰،۶۵، عمر مفید ترانسفورماتور کاهش پیدا خواهد کرد. با انجام محاسبات مشابه برای سایر ترانسفورماتورهای تغذیه محرکه های **dc**، مقادیر ضریب پیری و درصد کاهش عمر ترانسها با فرض دمای محیط ۳۰ درجه مطابق جدول ۴ بدست آمد. جدول ۴ نشان می دهد که در ماشین کاغذ، عمر ترانسفورماتورهای در صورت افزایش بار آن در بخش پرس از همه کمتر خواهد بود چون ضریب پیری آن از همه ترانسها بیشتر خواهد شد است. بهمین علت در طراحی، بار ترانسفورماتورهای تغذیه محرکه ها کمتر از ۶۵٪ در نظر گرفته شده است.

۷- راه حلهای پیشنهادی برای کاهش اثرات سوء کیفیت توان

با توجه به داده های گرفته شده در طی حدود یکسال در کارخانه کاغذسازی راه حلهای زیر برای حل مشکلات ناشی از اثرات متقابل کیفیت توان و مبدلهای الکترونیک قدرت مورد بررسی قرار گرفته و در انتها پیشنهاد فنی ارائه می گردد. بقیه راهکارهای اصلاحی با توجه به توان بالای مصرفی، مقرون بصره نمی باشد بهمین دلیل از بررسی آنها صرفنظر شده است.

۱- بررسی در مورد امکان استفاده از **servo stabilizer** جهت تثبیت ولتاژ: در این روش پس از حس کردن کمبود ولتاژ، تعداد دورهای سیم پیچی ثانویه ترانسفورماتور برای تثبیت ولتاژ، به تناسب تغییر خواهد کرد. که به علت سرعت پاسخ پایین

۴- با توجه به بررسیهای فوق الذکر، سیستم پیشنهادی جهت تصحیح و تثبیت ولتاژ شبکه و هارمونیکها در قسمت محرکه های القایی، سیستمهای تثبیت ولتاژ دینامیکی با استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت می باشد. با استفاده از این تثبیت کننده ولتاژ، جبران کامل کمبود ولتاژ شبکه سه فاز تا ۷۰٪ ولتاژ نامی و بمدت حداقل ۱۰ ثانیه محقق خواهند شد.

مشخصات فنی این دستگاه بشرح زیر می باشد:

شرکت سازنده: **Cutler-Hammer**

قدرت: ۱,۲۵ مگا ولت آمپر.

ضریب توان بار: ۰-۱ پیشفاز یا پسفاز.

اضافه بار: تا ۱۵٪ با ۱۰٪ جبران ولتاژ.

ولتاژ نامی ورودی: ۴۱۵/۴۰۰/۳۸۰ ولت و ۵۰ هرتز، سه فاز، سه سیمه.

حداکثر ولتاژ ورودی: سه فاز حداکثر تا ۱۱۰٪ ولتاژ نامی.

حداقل ولتاژ ورودی: سه فاز حداقل تا ۵۰٪ ولتاژ نامی.

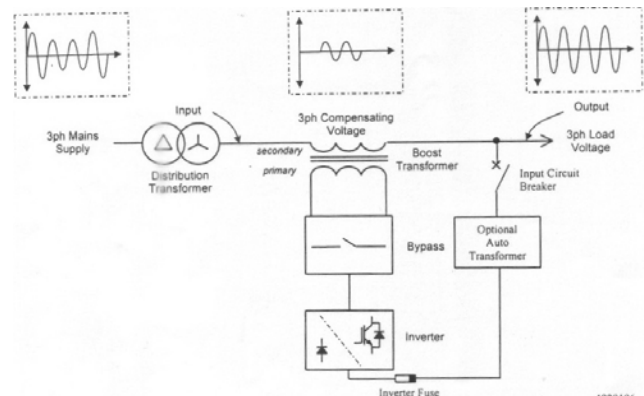
ولتاژ خروجی: سه فاز با حداکثر ۱۰٪ تغییرات نسبت به ولتاژ نامی.

سرعت پاسخ دهی: ۱ میلی ثانیه.

بازده سیستم: ۹۸-۹۹٪.

قیمت: ۲,۵۶۲,۵۰۰,۰۰۰ ریال با هزینه نصب و راه اندازی و ضمانت توسط شرکت ایرانی.

این دستگاه با داشتن عناصر فعال، شامل اینورتر منبع ولتاژ (VSI)، مدار بای پس و ترانسفورماتور تزریق ولتاژ است که بطور سری با منبع تغذیه اصلی مطابق شکل ۸ در مدار قرار می گیرد (مانند شکل ۸، ترکیبی از SVC, DVR می باشد).



شکل ۸- بلوک دیاگرام تثبیت کننده ولتاژ پیشنهادی

همواره در حد مجاز تنظیم شده و اغتشاشات ولتاژ شبکه روی بار تاثیر نگذارد.

#### ۸- توجیه اقتصادی روش اصلاحی پیشنهادی

برای توجیه اقتصادی روش پیشنهادی باید میزان خسارت را در مدت معین در کارخانه کاغذ سازی برآورد کرد. در صنایع کاغذ سازی معمولاً میزان خسارت وارده در اثر هر توقف تولید را برابر با قیمت کاغذ تولید نشده در طی زمان توقف با احتساب استهلاک دستگاهها در نظر می گیرند.

مثلاً ماشین کاغذ ۱ با سرعت خطی حدود ۷۶۰ متر در دقیقه، تقریباً ۱۴ تن در ساعت کاغذ روزنامه تولید می کند (۲۳۳,۳ کیلوگرم در هر دقیقه). با در نظر گرفتن قیمت کاغذ روزنامه بقرار کیلویی ۴۲۵۰ ریال، می توان نتیجه گرفت میزان خسارت در خط تولید کاغذ روزنامه در هر دقیقه حدود یک میلیون ریال می باشد. بنابراین ۲ ساعت توقف تولید خسارتی معادل ۱۲۰ میلیون ریال به همراه خواهد داشت.

در ماشین کاغذ ۲ با سرعت خطی حدود ۴۳۰ متر در دقیقه، تقریباً ۱۳,۳ تن در ساعت کاغذ روزنامه تولید می کند (۲۲۲,۲ کیلوگرم در هر دقیقه). با در نظر گرفتن قیمت کاغذ روزنامه بقرار کیلویی ۴۰۰۰ ریال، می توان نتیجه گرفت میزان خسارت در خط تولید کاغذ روزنامه در هر دقیقه حدود ۹۰ هزار ریال می باشد. بنابراین ۵۰ دقیقه توقف تولید خسارتی معادل ۴۵ میلیون ریال به همراه خواهد داشت. در نتیجه خسارت وارده در اثر وقوع یک کمبود ولتاژ فقط در خط تولید کاغذ حدود ۱۶۵ میلیون ریال برآورد شد. این برآورد شامل تجهیزات آسیب دیده در اثر حادثه نمی شود. البته همانطوریکه قبلاً ذکر شد، میزان خسارت وارده در هر کمبود ولتاژ متفاوت است. مثلاً

در یک کمبود ولتاژ، میزان خسارت برآورد شده به ۴۵۰ میلیون ریال رسید. بنابراین این میزان خسارت را می توان بطور متوسط حدود ۲۰۰ میلیون ریال در نظر گرفت. چون گاهی اوقات هنگام کمبود ولتاژ، تجهیزات حساسی مانند بوردهای الکترونیکی محرکه ها و یا PLC, DCS که معمولاً گرانقیمت نیز هستند، معیوب می شوند. با توجه به میزان توقف تولید سالانه در اثر کمبود ولتاژ (۱۶ مورد در سال) و خسارت ناشی از آن در هر بار (حدود ۲۰۰ میلیون) می توان نتیجه گرفت که در مدت پنج سال مبلغ سرمایه گذاری شده برای خرید ۶ عدد تثبیت کننده ولتاژ برای ۶ ترانسفورماتور ماشینهای کاغذ سازی، برگشت خواهد کرد یعنی کاملاً توجیه اقتصادی دارد.

#### ۹- نتیجه

در این مقاله نتایج حاصل از مانیتورینگ کیفیت توان در صنایع چوب و کاغذ مازندران بمدت حدود یکسال ارائه گردید. این مطالعات نشان می دهند که ۷۷ مورد کمبود ولتاژ و ۳ مورد بیشبود ولتاژ در مدت یکسال در کارخانه رخ داد. در ۱۶ مورد، باعث توقف خط تولید شد. منشا بیشتر این کمبود ولتاژها از طرف شبکه توزیع و بیرون کارخانه بود. در هر با توقف، بطور متوسط ۲۰۰ میلیون ریال خسارت به کارخانه وارد می شد. محرکه های القایی باعث داشتن یکسو کننده های تریستوری ۶ پالسه، جریان محرکه دارای هارمونیکهای مرتبه ۵ و ۷ و ۱۱ و ۱۳ بود که باعث افزایش تلفات ادی و پراکندگی ترانسفورماتور تغذیه محرکه ها می شد. با محاسبات نشان داده شد که وجود هارمونیک در جریان ترانسفورماتور باعث افزایش دمای آن و

بنابراین با توجه به موارد فوق می توان با فراهم آوردن منبع تغذیه با کیفیت مطلوب، بارهای حساس را در برابر اعوجاج ولتاژ ورودی محافظت کرد. این دستگاه با داشتن عناصر فعال، شامل اینورتر منبع ولتاژ (VSI)، مدار بای پس و ترانسفورماتور تزریق ولتاژ است که بطور سری با منبع تغذیه اصلی در مدار قرار می گیرد (ترکیبی از SVC, DVR می باشد). اصول کار این دستگاه بدین صورت است که در هنگام کمبود ولتاژ شبکه، به اندازه ای که ولتاژ کاهش یافته، توسط اینورتر (شامل IGBT های کنترل شده با میکرو پروسور)، ولتاژ تولید کرده و به ولتاژ شبکه توسط ترانسفورماتوری که بصورت سری قرار گرفته، اضافه می نماید. انرژی لازم در این زمان از همان ولتاژ ورودی گرفته می شود. اینکار باعث می شود تا ولتاژ بار

[11] H. G. Sarmiento and E. Estrada, "A voltage sag study in an industry with adjustable speed drives," *IEEE Ind. Application Mag.*, vol. 2, pp. 16–19, Jan./Feb. 1996.

[12] M. Radmehr, Sh. Farhangi, S. A. Nabavi Niaki, "Voltage Sag study in Mazandaran Wood & Paper Industries", 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Technical and Physical Problems in Power Engineering, TPE 2004, Tabriz-Iran, pp 245-249.

[13] M. Radmehr, Sh. Farhangi, S. A. Nabavi Niaki, "Effects of Power Quality on Electrical Drives in Mazandaran Wood & Paper Industries", *IJSIT Lecture Notes of 1st Int. conf.*

on Informatics (ICI-2004), Vol1, No.2, Sep. 2004, pp 216-220.

[14] IEEE Std C57.110-1998, IEEE Recommended Practice for establishing transformer capability.

[15] IEEE Std. C57.12.90-1993, IEEE standard test code for liquid immersed distribution, power and regulating transformers and IEEE guide for short circuit testing of distribution and power transformers.

[16] G. W. Massey, "Estimation method for power system harmonic effect on power distribution transformer," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 30, no. 2, pp. 485-489, 1994.

[17] W. Neves, H. W. Dommel, and W. Xu, "practical distribution transformer models for harmonic studies," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 10, no. 2, pp. 906-912, 1995.

[18] M. T. Bishop, J. F. Baranwski, D. Heath and S. J. Benna, "Evaluating harmonic-induced transformer heating," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 305-311, 1996.

[19] M. Radmehr, Sh. Farhangi, S. A. Nabavi Niaki, "Effects of Electrical Drives on Transformer Loss of Life in Mazandaran Wood & Paper Industries", *IJSIT Lecture Notes of 1st Int. conf. on Informatics (ICI-2004)*, Vol1, No.2, Sep. 2004, pp 211-215.

[20] M. Radmehr, Sh. Farhangi, "Transformer Loss of Life in Mazandaran Wood & Paper Industries due to Current Harmonics", 13<sup>th</sup> Iranian Conference on Electrical Engineering,

در نتیجه سبب کاهش عمر مفید ترانسفورماتور می شود. این تحقیق نشان می دهد که در کارخانه کاغذ سازی علاوه بر ضرورت مانیتورینگ کیفیت توان بطور پیوسته، استفاده از تثبیت کننده های ولتاژ دینامیکی برای کاهش اثرات سوء ناشی از کمبود ولتاژ شبکه ضروری بنظر می رسد و کاملاً توجیه اقتصادی دارد. معمولاً ارائه راه حل بهینه برای کاهش اثرات سوء ناشی از بدی کیفیت توان در نتیجه همکاری مشترک بین تولید کننده برق، سازنده دستگاههای حساس و مصرف کننده تحقق می یابد. در برخی از کشورها مانند سنگاپور هزینه اجرای چنین راهکارهای اصلاحی را تولید کننده و مصرف کننده مشترکاً پرداخت می کنند چون معمولاً کمبود ولتاژ از طرف برق منطقه ای بوده و تا حدودی کریز ناپذیر است.

## مراجع

[1] R. Schottler and R. G. Coney, "Commercial application Experiences with SMES", *Power Engineering Journal*, June 1999.

[2] R. Mchattie, "Dynamic Voltage Restores, The Costomer's Perspective", *IEEE Colloquium*, Glasgow, 11 Feb. 1998.

[3] D. Chapman, "The cost of poor power quality", *Copper Development Association* March 2001.

[4] C. Melhorn, T. Davis, G. Beam, "Voltage Sags: Their Impact on the Utility and Industrial Customers", *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, vol 34, No. 3, May/June 1998, pp. 549-558.

[5] Y. Yin, A. Y. Wu, "Transient Response of Electric Drive Under Utility Upset Condition", *Conf. Record of 1996 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conf.*, June 10-14, 1996 Birmingham, pp 77-85.

[6] D. W. Petro, R. L. Wood, "Power Quality Issues Regarding Adjustable Speed Drives in Petroleum Terminals", *IEEE PCIC* 1994.

[7] W. Jun and T. K. Saha, "Simulation of Power Quality on University Distribution system", [www.elec.uq.edu.au/~saha/pqpaper.pdf](http://www.elec.uq.edu.au/~saha/pqpaper.pdf)

[8] J. L. Dur'an-G'omez and P. Enjeti, "A low cost approach to improve the performance of an adjustable speed drive (ASD) under voltage sags and short-term power interruptions," in *Proc. IEEE APEC'98*, 1998, vol. 2, pp. 587–591.

[9] Peeran, Syed, S. V. Carolsfeld, Rudoff, "A Case Study of Power Quality Metering For Short Term Disturbance Analysis", *IEEE Conf.* 1998.

[10] [www.mazpaper.com](http://www.mazpaper.com)



