

به نام خدا

# تأثیر اتصالات ترانسفورمر بر انتشار افت ولتاژ در سیستم توزیع

گردآوری

ابراهیم کریمی، مسعود نصری

## کلمات کلیدی

انتشار افت ولتاژ، ترانسفورمر، کیفیت توان

## چکیده

این مقاله به بررسی تأثیر انواع اتصالات سیم پیچی ترانسفورمرها بر انتشار افت ولتاژ می‌پردازد. افت ولتاژها می‌تواند ناشی از خطاهای متقارن یا نامتقارن در سیستم توزیع باشند. در مقاله حاضر نوع خاصی از انتشار افت ولتاژ که از شین مصرف کنندگان به تجهیزات صنعتی از طریق ترانسفورمرهای به کار گرفته شده در ورودی تجهیزات انتقال می‌یابد، ملاحظه می‌شود. مطالعات روی یک شبکه معمولی با سطح ولتاژ ۲۰ کیلو ولت انجام شده است. نتیجه‌ای که از این مطالعه بدست خواهد آمد آن است که عملکرد افت ولتاژ درون تجهیزات صنعتی تابعی از اتصال به کار گرفته شده در ترانسفورمرهاست.



## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، نگرانی‌های جدی درباره کیفیت توان<sup>۱</sup> در بین شرکت‌های توزیع و نیز مصرف‌کنندگان ایجاد شده است. علت این امر استفاده گسترده از وسایل الکترونیکی حساس در فرآیندهای خودکار است. از سوی دیگر این تجهیزات، خود ایجادکننده پدیده‌های کیفیت توان هستند [۲ و ۱].

از میان پدیده‌های کیفیت توان، افت ولتاژ (به خصوص در استاندارد ایران) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زمانی که دامنه و بازده افت ولتاژ از آستانه حساسیت تجهیزات مصرف‌کننده‌ها فراتر می‌رود، قطعی در عملکرد آنها ایجاد می‌شود که منجر به توقف تولید و خسارات قابل توجه خواهد شد. بنابراین باید افت ولتاژ و ویژگیهای آن را به خوبی شناخت [۳ و ۴].

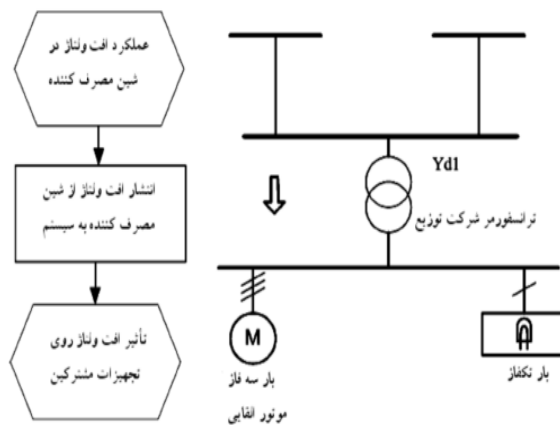
افت ولتاژ بر اثر خطاهای متقارن یا نامتقارن در سیستم توزیع، ایجاد می‌شود. تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان، در زمانی که خطاهایی در سیستم انتقال رخ می‌دهد، دچار افت ولتاژ خواهند شد که این مصرف‌کنندگان ممکن است از محل خطا بسیار دور باشند، ولی در سیستم توزیع، افت ولتاژ تنها در شین‌های محلی و نزدیک به محل خطا رخ می‌دهد [۵، ۶].

تعداد و ویژگی‌های افت ولتاژ که به عنوان عملکرد افت ولتاژ<sup>۲</sup> شناخته می‌شود، در هر شین می‌تواند متفاوت از شین دیگر یا از شین خطا باشد. تفاوت عملکرد افت ولتاژ یعنی به طور خاص رابطه اندازه و زاویه فاز ولتاژ، نتیجه‌ای از انتشار افت ولتاژ از محل اصلی خطا به شین‌های مصرف‌کننده است [۵]. انتشار افت ولتاژ از طریق انواع اتصالات ترانسفورمری منجر به عملکرد افت ولتاژ متفاوتی در ثانویه ترانسفورمر خواهد شد. در حالت عادی، انتشار افت ولتاژ یعنی عبور افت ولتاژ از سطح ولتاژ بالا به سطح ولتاژ پایین. به خاطر امپدانس ترانسفورمرهای کاهنده، جهت معکوس انتشار قابل ملاحظه نیست [۷].

نوعی انتشار افت ولتاژ از شین‌های مصرف‌کننده به تجهیزات صنعتی در شکل ۱ نشان داده شده است [۸]. لازم است انواع اتصالات ترانسفورمری برای مطالعه انتشار افت ولتاژ بررسی شود. برای این منظور ابتدا به مرور اجمالی ویژگی‌های افت ولتاژ پرداخته می‌شود.

<sup>1</sup> Power Quality

<sup>2</sup> performance of voltage sag

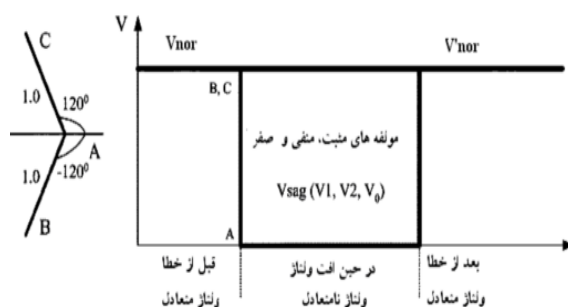


شکل ۱- انتشار افت ولتاژ از یک مشترک به دیگر مشترکین

## ۲. ویژگی های افت ولتاژ

افت ولتاژ به صورت کاهش مقدار موثر ولتاژ متناوب بین ۰/۱ تا ۰/۹ پریونیت در فرکانس قدرت با بازه‌ای از ۰/۵ سیکل تا یک دقیقه تعریف می‌شود. در این مقاله، منظور از دامنه بازه افت ولتاژ، به ترتیب، ولتاژ باقیمانده شین در طول خطا و زمان لازم برای رفع خطاست. اندازه و بازه افت ولتاژ از مهم‌ترین ویژگی‌های آن است که برای دستیابی به شاخص تجهیزات استفاده می‌شود [۹].

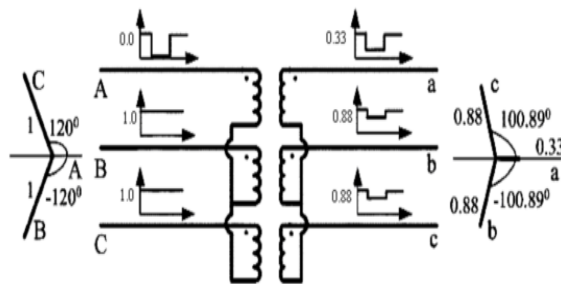
بدترین نوع خطا در سیستم، خطای تکفاز به زمین است که منجر به افت ولتاژ نامتقارن می‌شود. این مطلب در شکل ۲ نشان داده شده است. هر سه مؤلفه مثبت، منفی و صفر در این نوع خطا شرکت می‌کنند. به طور مشابه خطای دو فاز به زمین همواره دارای مؤلفه‌های مثبت، منفی و صفر است ولی افت ولتاژ ناشی از خطای سه فاز متقارن تنها دارای مؤلفه مثبت است. بنابراین افت ولتاژ ناشی از خطای نامتقارن می‌تواند به عنوان افت ولتاژ نامتقارن موقتی توصیف شود [۱۰].



شکل ۲- رابطه اندازه و فاز افت ولتاژ نامتقارن ایجاد شده توسط خطای تکفاز به زمین

### ۳. تأثیر اتصالات ترانسفورمر بر انتشار افت ولتاژ

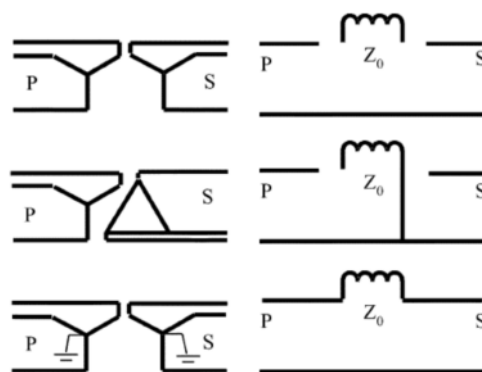
تأثیر اتصالات ترانسفورمر بر انتشار افت ولتاژ در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل افت ولتاژ شامل مولفه صفر است، ولی اتصالات ترانسفورمر اجازه نمی‌دهد این مولفه ایجاد شود. در برخی انواع افت ولتاژ، مولفه صفر وجود ندارد ولی به خاطر اتصالات ترانسفورمر که خود انتقال فاز ایجاد می‌کند، افت ولتاژ اثرات خود را خواهد داشت.



شکل ۳- انتشار افت ولتاژ نامتقارن ایجاد شده توسط خطای تکفاز به زمین از طریق

ترانسفورمر  $Yy0$

علاوه بر این به خاطر ترکیبات مختلف برای اتصالات ترانسفورمر، مطابق شکل ۴، اثرات افت ولتاژ ایجاد خواهد شد. بر این اساس می‌توان اتصالات ترانسفورمری را به سه گروه اصلی تقسیم کرد. این دسته بندی بر اساس تأثیر آنها بر انتشار افت ولتاژ است [۵۴].



شکل ۴- مدار معادل مولفه صفر برای اتصالات مختلف

تفاوت بین عملکرد افت ولتاژ در اولیه و ثانویه زمانی ایجاد می‌شود که افت ولتاژ ناشی از خطای تک فاز به زمین یا دو فاز به زمین باشد که از ترانسفورمر  $Yy$  یا  $Dd$  عبور می‌کند [۶]. دلیل این امر مطابق شکل ۴ آن است که این نوع ترانسفورمر اجازه عبور به مولفه صفر نمی‌دهد. در صورتی که خطای فاز به فاز رخ دهد، افت ولتاژ مشابهی در طرف ثانویه ترانسفورمرهای  $Yy$  یا  $Dd$  مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در جدول ۱ نمونه‌ای از انتشار افت ولتاژ دیده می‌شود؛ افت ولتاژ ناشی از خطای تکفاز یا دو فاز به زمین (

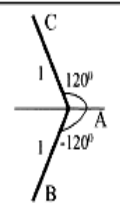
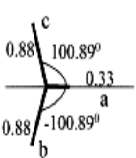
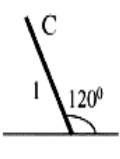
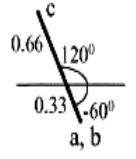
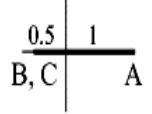
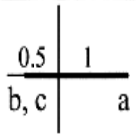
افت ولتاژ در یک یا دو فاز در اولیه ( تبدیل به افت ولتاژ با اندازه و فازهای متفاوت در ثانویه خواهد شد. این افت ولتاژ در هر سه فاز ایجاد می‌شود.

از سوی دیگر، در صورتی که ولتاژ یک یا دو فاز در اولیه این ترانسفورمرها به صفر برسد، ولتاژ ثانویه حداقل ۳۳٪ پریونیت خواهد شد. بنابراین با قطعی موقتی نامتقارن در اولیه، تنها افت ولتاژ در ثانویه ایجاد خواهد شد. انواع دیگر اتصالات برای  $Yy$  نیز در این جدول مشاهده می‌شود. تفاوت زمانی چشمگیر خواهد شد که انتشار افت ولتاژ از طریق ترانسفورمر  $Ydl$  ( که مشابه ترانسفورمرهای نوع اول در برابر عبور مولفه صفر مقاومت می‌کند ) باشد. علاوه بر این در ثانویه انتقال فاز نیز رخ خواهد داد. انتقال فاز با توجه به گروه ترانسفورماتور ۳۰ + ، ۹۰ + ، یا ۱۵۰ + خواهد بود.

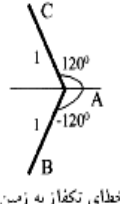
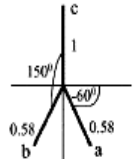
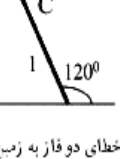
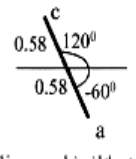
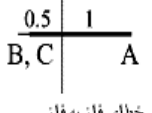
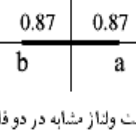
ترانسفورمر  $Ydl$  ویژگی دیگری برای افت ولتاژ دارد؛ در دو فاز افت ولتاژ ایجاد خواهد شد و فاز دیگر سالم خواهد ماند یا قطع خواهد شد. این مطلب در جدول ۲ نمایش داده شده است. مشابه  $Dd$  و  $Yy$ ، اندازه افت ولتاژ در دو فاز کمتر از ۵۸٪ نخواهد شد. در مقابل فاز دیگر بدون افت ولتاژ و سالم خواهد ماند یا اینکه به طور کامل قطع خواهد شد. برای خطای تکفاز به زمین حالت اول و برای دیگر خطاهای متقارن حالت دوم ( قطع یک فاز ) رخ خواهد داد. انواع دیگر این دسته در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در جدول ۳، انتشار افت ولتاژ ایجاد شده بوسیله انواع خطاهای نامتقارن در ترانسفورمر  $Ygy$  آورده شده است. هر خطایی در اولیه منجر به خطای مشابهی در ثانویه خواهد شد. دلیل این امر در شکل ۴ نشان داده شده است.

که در آن، ترانسفورماتور  $Ygy$  اجازه عبور به مولفه صفر می‌دهد.

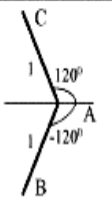
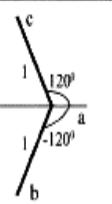
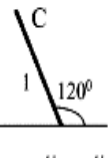
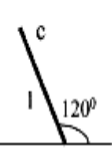
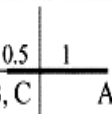
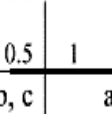
جدول ۱- انتشار افت ولتاژ در اثر خطاهای نامتقارن در عبور از ترانسفورمرهای دسته اول

عامل ایجاد افت ولتاژ	اتصال ترانسفورمر	انتشار افت ولتاژ
 <p>خطای تکفاز به زمین</p>	<p>Yy0 Yygo YGy0 Dd0</p>	 <p>افت ولتاژ در هر سه فاز</p>
 <p>خطای دو فاز به زمین</p>	<p>Yy0 Yygo YGy0 Dd0</p>	 <p>افت ولتاژ در هر سه فاز</p>
 <p>خطای فاز به فاز</p>	<p>Yy0 Yygo YGy0 Dd0</p>	 <p>افت ولتاژ مشابه</p>

جدول ۲- انتشار افت ولتاژ در اثر خطاهای نامتقارن در عبور از ترانسفورمرهای دسته دوم

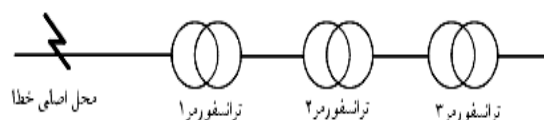
عامل ایجاد افت ولتاژ	اتصال ترانسفورمر	انتشار افت ولتاژ
 <p>خطای تکفاز به زمین</p>	<p>Dy1 Yd1 YGd1 Dyg1</p>	 <p>افت ولتاژ مشابه در دو فاز</p>
 <p>خطای دو فاز به زمین</p>	<p>Dy1 Yd1 YGd1 Dyg1</p>	 <p>افت ولتاژ مشابه در دو فاز و قطعی در فاز دیگر</p>
 <p>خطای فاز به فاز</p>	<p>Dy1 Yd1 YGd1 Dyg1</p>	 <p>افت ولتاژ مشابه در دو فاز و قطعی در فاز دیگر</p>

جدول ۳- انتشار افت ولتاژ در اثر خطاهای نامتقارن در عبور از ترانسفورمرهای دسته سوم

عامل ایجاد افت ولتاژ	اتصال ترانسفورمر	انتشار افت ولتاژ
 خطای تکفاز به زمین	YGyg0	 افت ولتاژی مشابه اولیه
 خطای دو فاز به زمین	YGyg0	 افت ولتاژی مشابه اولیه
 خطای فاز به فاز	YGyg0	 افت ولتاژی مشابه اولیه

#### ۴. اتصال آبخاری ترانسفورمرها

در ارتباط با انتشار افت ولتاژ از طریق چند ترانسفورماتور  $Yy$ ، به صورتی که در شکل ۵ نشان داده شده است، می توان گفت تنها ترانسفورمر اول افت ولتاژ را تغییر خواهد داد و در ثانویه خود ولتاژ متفاوتی خواهد دید. در بقیه ترانسفورمرها به دلیل آنکه مولفه صفر از بین رفته است، در ثانویه ولتاژی مشابهی اولیه وجود خواهد داشت. این مطلب در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۵- اتصال آبخاری ترانسفورمرها

زمانی که ترانسفورمرهای  $Yd$  به صورت آبخاری قرار گرفته باشند، ترانسفورمرهای با شماره زوج یا فرد تأثیرات مشابهی روی افت ولتاژ خواهند داشت. این مطلب در جدول ۵ نشان داده شده است. تأثیرات هر دسته از این ترانسفورمرهای مشابه خواهد بود. تأثیری که ترانسفورمرهای با شماره زوج روی افت ولتاژ ایجاد خواهند کرد مشابه تأثیری است که ترانسفورمر  $Yy$  ایجاد می کند. علاوه بر این زمانی که خطا از نوع خط به خط باشد، تأثیرات این ترانسفورمرها به گونه ای است که ولتاژ خروجی مشابه ولتاژ در محل اصلی خطا خواهد بود. مشخصه افت ولتاژها مشابه خواهد بود، ولی جهت فازها و نیز فازهایی که وجود

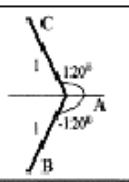
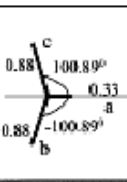
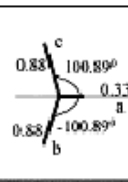
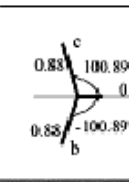
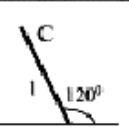
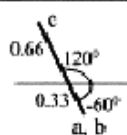
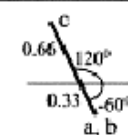
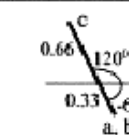
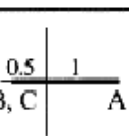
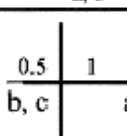
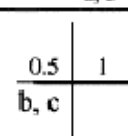
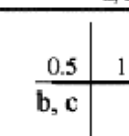
دارند، متفاوت خواهند بود. از سوی دیگر در ترانسفورمرهای با شماره فرد، در تمام حالات به جز خطای تکفاز به زمین، در ثانویه قطعی ایجاد خواهد شد. زمانی که ترانسفورمرهای  $Yd$  و  $Yy$  به صورت سری قرار گرفته‌اند، تأثیر ترانسفورمر  $Yy$  به شدت وابسته به مکان قرار گرفتن این ترانسفورمر است با توجه به جداول ۶ و ۷ می‌توان گفت که تنها زمانی که ترانسفورماتورها  $Yy$  اولین ترانسفورمر بعد از محل خطا باشد، تأثیرات آن ایجاد خواهد شد. بدون توجه به موقعیت ترانسفورمر، ترانسفورمر  $Yd$  مشخصه افت ولتاژ را به دلیل انتقال فاز تغییر می‌دهد.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر نحوه اتصالات ترانسفورمر در انتشار افت ولتاژ به طور مفصل بررسی شده است که می‌تواند مورد استفاده مهندسان سیستم توزیع به منظور طراحی بهینه قرار گیرد. در این مقاله نشان داده شده است که تأثیر به شدت وابسته به نوع اتصالات است. از نتایج این مقاله نمایان است که بهترین نوع اتصال،  $Yd$  است.

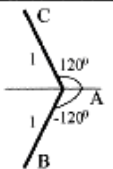
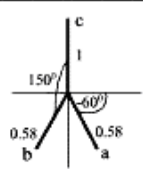
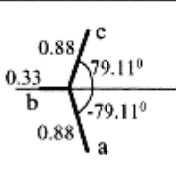
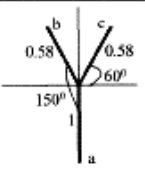
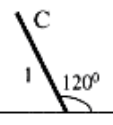
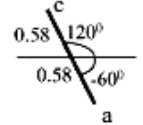
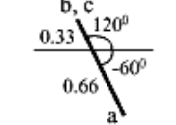
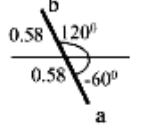
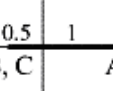
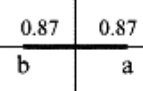
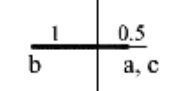
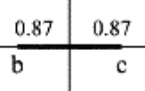
دلیل این امر کاهش میزان افت ولتاژ در عبور از این ترانسفورمر است. از سوی دیگر در استفاده از این نوع اتصال تعداد قطعی‌های بیشتری مورد انتظار است. می‌توان مشاهده نمود که ترانسفورمرهای  $Yd1, Yd5, Yd11$  به میزان مشابه بر اندازه افت ولتاژ تأثیر می‌گذارند. این در حالی است که انتقال فاز ایجاد شده توسط هر یک به طور کلی متفاوت از دیگری است. علاوه بر این نشان داده شد که ترانسفورمرهای  $Dd0$  و  $Yy0$  میزان قطعی‌های موقت را کاهش می‌دهد.

جدول ۴- انتشار افت ولتاژ در اثر عبور از سه ترانسفورمر  $Yy$  سری

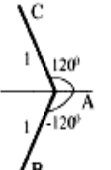
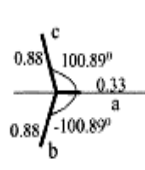
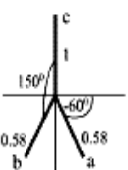
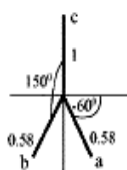

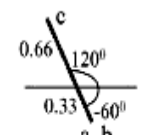
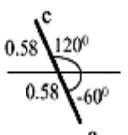
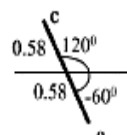
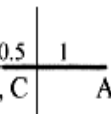
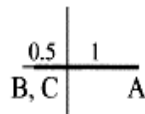
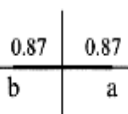
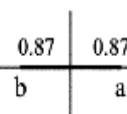
عامل ایجاد	افت ولتاژ در محل خطا	عبور از ترانسفورمر اول	عبور از ترانسفورمر دوم	عبور از ترانسفورمر سوم
خطای تکفاز به زمین				
خطای دو فاز به زمین				
خطای فاز به فاز				



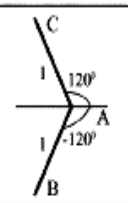

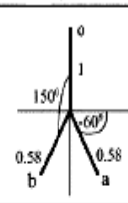
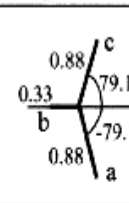
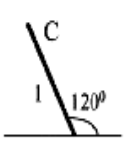
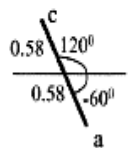
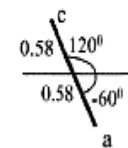
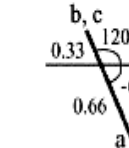
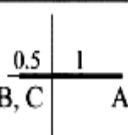
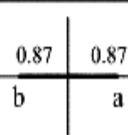
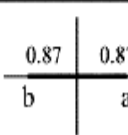

جدول ۵- انتشار افت ولتاژ در اثر عبور از سه ترانسفورمر  $Yd$  سری

عامل ایجاد	افت ولتاژ در محل خطا	عبور از ترانسفورمر اول	عبور از ترانسفورمر دوم	عبور از ترانسفورمر سوم
خطای تکفاز به زمین				
خطای دو فاز به زمین				
خطای فاز به فاز				

جدول ۶- انتشار افت ولتاژ در اثر عبور از سه ترانسفورمر سری  $Yy, Yd, Yy$

عامل ایجاد	افت ولتاژ در محل خطا	عبور از ترانسفورمر اول $Yy$	عبور از ترانسفورمر دوم $Yd$	عبور از ترانسفورمر سوم $Yy$
خطای تکفاز به زمین				
خطای دو فاز به زمین				
خطای فاز به فاز				

جدول ۷- انتشار افت ولتاژ در اثر عبور از سه ترانسفورمر سری  $Yd, Yy, Yd$

عامل ایجاد	افت ولتاژ در محل خطا	عبور از ترانسفورمر $Yd$ اول	عبور از ترانسفورمر $Yy$ دوم	عبور از ترانسفورمر $Yd$ سوم
خطای تکفاز به زمین				
خطای دوفاز به زمین				
خطای فاز به فاز				

## ۶. مراجع

- [1] T. A. Short, A. Mansoor, W. Sunderman, and A. Sundaram, "Site variation and prediction of power quality," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 4, pp. 1369–1375, Oct. 2003.
- [2] IEEE Recommended Practice for Electric Power System Compatibility

*With Electronic Process Equipment, IEEE Std. 1346-1998.*

- [3] J. Wang, S. Chen, and T. T. Lie, "System Voltage Sag Performance Estimation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, VOL. 20, No. 2, April 2005.
- [4] "Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 6, Nov./Dec. 1996.
- [5] Myo Thu Aung, Jovica V. Milanovic, and C. P. Gupta, "Propagation of Asymmetrical Sags and the Influence of Boundary Crossing Lines on Voltage Sag Prediction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, VOL.19, No.4, Oct 2004.
- [6] Wang, P., Jenkins, N., and Bollen, M.H.J. "Experimental investigation of voltage sag mitigation by an advanced static VAr compensator", *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1998, 13, (4), pp. 1461–1467
- [7] IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distribution Systems (IEEE C57.105-1978), 1992. Transformer Committee of the IEEE Power Engineering Society.

- [8] M. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. Samotyj, "Voltage sag in industrial systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 2, Mar./Apr. 1993
- [9] M. D. Nitnrihter, D. I. Banjai, R. M. Ciric, "Power Qurdity Indices of Distribution Network – Definitions and Evaluation", *IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, Aug. 29-Sept. 2, 1999.*
- [10] W.-H. Edwin Lui, Ling G. Tu, H. Wayne Hong, W. Zhong, "An Integrated Application for Voltage sag Analysis", *IEEE Trans. On Power System, Vol. 13, No. 3, 1998, pp. 930-935.*