

محاسبه و قیمت گذاری تلفات هارمونیکی ترانسفورماتورهای

توزیع در شرایط بارگذاری هارمونیکی

جواد بهکش

شرکت توزیع نیروی برق استان اردبیل

اردبیل، ایران

jj330vgmail@.com

مقاله جهت تخمین تلفات هارمونیکی ترانسفورماتورها از معادلات منتشر شده در (Emanuel A.E.(IEEE) اخذ شده است. در ادامه یک الگوریتم برای تعیین میزان انرژی تلف شده ناشی از آلودگی هارمونیکی جریان در ترانسفورماتور با استفاده از اثر پوستی سیم پیچ ترانسفورماتور، اندازه‌های جریان در مرتبه هارمونیکی، تلفات ترانسفورماتور در شرایط نرمال سینوسی و تابع تصحیح واکنش میدان ارائه خواهد شد. ارزش تمام شده هر کیلووات ساعت هدر رفت انرژی ناشی از تلفات هارمونیکی (0.05\$=1950Rail) در نظر گرفته شده است. در نهایت با استفاده از اطلاعات اخذ شده از GIS برق شهرستان اردبیل، لیست فراوانی ترانسفورماتورهای توزیع موجود تهیه و میزان تلفات هارمونیکی سالیانه آنها به همراه ضرر اقتصادی برآورد خواهد گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بر اثر عبور جریان‌های هارمونیکی از ترانسفورماتورها سالیانه نزدیک 6.389 میلیارد ریال به شبکه برق شهرستان اردبیل ضرر وارد می‌شود.

واژه های کلیدی — تلفات هارمونیکی؛ ترانسفورماتور توزیع؛

اعوجاج هارمونیکی جریان؛ بار غیرخطی؛

چکیده — به علت افزایش فزاینده ادوات الکترونیک قدرت و عناصر غیرخطی در شبکه‌های توزیع میزان اعوجاج هارمونیکی جریان خطوط توزیع افزایش چشمگیری داشته است. علاوه بر این هارمونیک‌های ایجاد شده توسط‌های بارهای غیرخطی متصل به شبکه، می‌توانند بر خطوط، بار و سایر تجهیزات الکتریکی اطراف شبکه تاثیر منفی داشته باشند. معمولاً تخمین هزینه‌های خسارت ناشی از بارگذاری هارمونیکی شبکه شامل هزینه‌های تلفات هارمونیکی، پیری زودرس تجهیزات و خرابی آنها است. ترانسفورماتورهای توزیع یکی از تجهیزات شبکه هستند که در معرض اثرات نامطلوب بارگذاری هارمونیکی قرار دارند. افزایش تلفات اهمی، تلفات گردابی، تلفات هسته و کاهش توان بارگیری در ترانسفورماتورها از اثرات منفی بارگذاری هارمونیکی است. با توجه به فراوانی ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه‌های برق ارزیابی و تخمین تلفات هارمونیکی در ترانسفورماتورهای توزیع یکی از مطالبات شرکت‌های توزیع می‌باشد. در این مقاله سعی شده است میزان ضرر و زیان فنی ناشی از تلفات هارمونیکی در ۱۷ نوع از ترانسفورماتور توزیع کلاسیک و کم تلفات 'AB' تخمین و قیمت‌گذاری تلفات ناشی از عبور مولفه‌های هارمونیکی در ترانسفورماتورها بررسی گردد. معادلات بکار گرفته شده در این

از اطلاعات اخذ شده از GIS برق شهرستان اردبیل، لیست فراوانی ترانسفورماتورهای توزیع موجود تهیه و میزان تلفات هارمونیک سالیانه آنها به همراه ضرر اقتصادی برآورد خواهد گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بر اثر عبور جریان‌های هارمونیک از ترانسفورماتورها سالیانه نزدیک 6.389 میلیارد ریال به شبکه برق شهرستان اردبیل ضرر وارد می‌شود.

۲. تلفات هارمونیک ترانسفورماتور توزیع

افزایش میزان هارمونیک‌ها در جریان باعث افزایش مقدار موثر جریان کشیده شده از شبکه می‌شود، بنابراین تلفات شبکه نیز با توان دوم افزایش خواهد یافت [۸].

$$I_{rms} = \sqrt{I_{rms1}^2 + I_{rms2}^2 + I_{rms3}^2 + \dots} \quad (1)$$

$$P_{loss} = RI_{rms}^2 \quad (2)$$

عبور جریان با مولفه‌های هارمونیک از سیم پیچ ترانسفورماتورهای توزیع باعث افزایش تلفات اهمی، هسته و گردابی در آنها می‌گردد. در ترانسفورماتورهای توزیع تلفات کلی به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$P_{Loss-Total} = P_{Loss-NoLoad} + P_{Loss-FullLoad} \quad (3)$$

که در اینجا $P_{Loss-NoLoad}$ تلفات بی باری و $P_{Loss-FullLoad}$ تلفات بارگذاری ترانسفورماتور است.

طبق تعریف تلفات هارمونیک در یک فرکانس خاص عبارت است از:

$$P_h = P_f I_h^2 h^2 \quad (4)$$

که در اینجا P_f تلفات در فرکانس پایه، I_h اندازه جریان در h امین مرتبه هارمونیک است. مجموع تلفات ناشی از مولفه‌های جریان هارمونیک عبارت خواهد بود:

$$P_h = P_f \sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 h^2 \quad (5)$$

با این حال می‌توان اثرات مولفه‌های هارمونیک جریان در تلفات ترانسفورماتورهای را به صورت ذیل مدل کرد [۹]:

$$P_{h-Tot} = \frac{P_f}{(1+k_w)} \sum_{h=1}^{h_{max}} (I_h)^2 \left[1 + \frac{k_w \sum_{h=1}^{h_{max}} (hI_h)^2 k_h}{\sum_{h=1}^{h_{max}} (I_h)^2} \right] \quad (6)$$

که در اینجا k_h عبارت است از [۱۰]:

۱. مقدمه

گسترش روز افزون استفاده از تجهیزات با مشخصه غیرخطی بخصوص ادوات الکترونیک قدرت در ساختار وسایل برقی، همگی باعث کاهش کیفیت برق و ایجاد مشکلات زیادی برای مصرف‌کنندگان و شرکت‌های توزیع کننده انرژی شده است [۱]. با افزایش بارهای غیرخطی و ازدیاد آلودگی هارمونیک جریان شبکه، اغلب سایر تجهیزات متصل به شبکه نیز در معرض خسارت‌های ناشی از آلودگی هارمونیک قرار می‌گیرند [۲]. ترانسفورماتورهای توزیع به دلیل فراوانی آنها در شبکه‌های توزیع یکی از تجهیزاتی هستند که در معرض بیشترین تاثیرات مخرب و منفی ناشی از عبور جریان‌های هارمونیک قرار دارند [۳]. افزایش آلودگی هارمونیک جریان شبکه باعث افزایش تلفات اهمی، هسته و گردابی در ترانسفورماتورها می‌گردد. علاوه بر این گرم شدن، کاهش بارگیری، کاهش عمر مفید و سوختن ترانسفورماتور از عواقب نامطلوب آلودگی هارمونیک جریان شبکه است [۴]. تخمین تلفات هارمونیک ترانسفورماتورها و قیمت گذاری آن می‌تواند نشانگر اهمیت موضوع باشد. شناسایی و ارزیابی هزینه‌های خسارت هارمونیک‌ها همیشه آسان نیستند، این هزینه‌ها را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد [۵]:

- هزینه‌های فنی
- هزینه‌های اقتصادی

به طور کلی هزینه‌های فنی منجر به هزینه‌های اقتصادی می‌شود، به همین دلیل کنترل هزینه‌های فنی بسیار مهم است. علاوه بر این هزینه‌ها، برخی خسارات پنهان نیز از قبیل نیاز به گسترش شبکه، کاهش ظرفیت شبکه، وقفه در پروسه تولید و... می‌تواند اشاره کرد [۶].

در این مقاله سعی شده است برای تخمین تلفات هارمونیک در ترانسفورماتورهای توزیع از معادلات منشر شده در Emanuel A.E. (IEEE) استفاده شود. یک فلوچارت برای تعیین میزان انرژی تلف شده سالیانه مبتنی بر اثرات پوستی سیم پیچ ترانسفورماتور، اندازه جریان در مرتبه هارمونیک، تلفات ترانسفورماتور در شرایط سینوسی و تابع تصحیح واکنش میدان ارائه خواهد شد. سپس میزان ضرر و زیان فنی ناشی از تلفات هارمونیک در ۱۷ نوع از ترانسفورماتور توزیع قدیمی و کم تلفات AB^۲ تخمین و قیمت گذاری تلفات ترانسفورماتور ناشی از عبور مولفه‌های هارمونیک بررسی خواهد شد. ارزش تمام شده هر کیلووات ساعت هدر رفت انرژی ناشی از تلفات هارمونیک (0.05\$=1950Rail) در نظر گرفته شده است [۷]. در نهایت با استفاده

۳. تلفات ترانسفورماتورهای توزیع

شرکت‌های توزیع ایران، از انواع مختلف ترانسفورماتورها در شبکه‌های توزیع استفاده می‌کنند. بیشترین مقدار فراوانی ترانسفورماتورها موجود در سطح شرکت‌های توزیع، از نوع پرتلفات و کلاسیک است. در سال‌های گذشته با تغییر رویکرد شرکت‌های توزیع در بحث کاهش تلفات، استفاده از ترانسفورماتورهای AB' (کم تلفات) الزامی شده است. ترانسفورماتورهای کم تلفات (AB') دارای تلفات کمی نسبت به سایر ترانسفورماتورها هستند. بنابراین لازم است میزان تلفات آنها در محیط هارمونیک نیز مورد ارزیابی و با ترانسفورماتورهای کلاسیک مقایسه شود. مشخصات فنی و تلفات بارداری و بی‌باری هفده نوع مختلف ترانسفورماتورهای توزیع کم تلفات و کلاسیک در جدول (۲) نشان داده شده است.

$$k_h = (-0.78) + (3.853h^{1/2}) - (2.263h) + (0.1058h^{1.5}) + (0.2337h^2) - (0.06478h^{2.5}) + (0.0052535h^3) \quad (V)$$

h : مرتبه هارمونیک
 I_h : اندازه جریان در مرتبه هارمونیک h (پریونیت)
 k_w : ضریب تلفات آهن (نسبت اثر پوستی سم پیچ در فرکانس 50Hz)
 P_f : تلفات کل ترانسفورماتور در بار کاملاً سینوسی
 k_h : تابع تصحیح به دلیل اثرات متقابل میدان
 P_{h_Tot} : تلفات هارمونیک کلی ترانسفورماتور

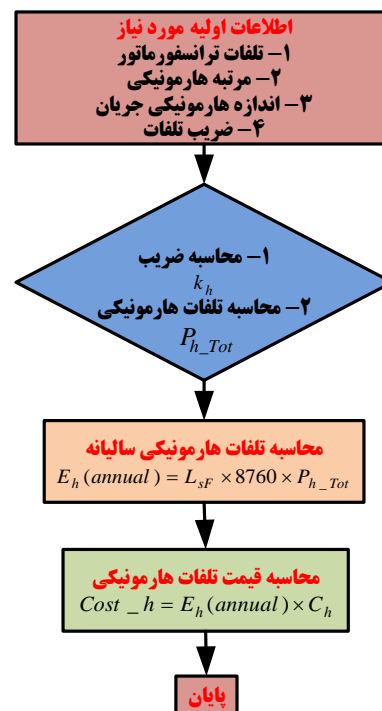
فلوچارت محاسبه و قیمت گذاری تلفات و انرژی تلف شده هارمونیک سالیانه در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۲: تلفات بی‌باری و بارداری ترانسفورماتورهای توزیع [۱۱]

ظرفیت (KVA)		ترانسفورماتور AB'		ترانسفورماتور کلاسیک	
تلفات بی‌باری (W)	تلفات بارداری (W)	تلفات بی‌باری (W)	تلفات بارداری (W)	تلفات بی‌باری (W)	تلفات بارداری (W)
110	700	135	810	25	110
145	1100	190	1350	50	145
203	1425	255	1750	75	203
260	1750	320	2150	100	260
310	2000	380	2545	125	310
375	2350	460	3100	160	375
445	2760	550	3600	200	445
530	3250	650	4200	250	530
625	3850	780	5000	315	625
750	4600	930	6000	400	750
875	5450	1100	7100	500	875
940	6750	1200	8700	630	940
1150	8500	1450	10700	800	1150
1400	10500	1700	13000	1000	1400
1730	13200	2100	16000	1250	1730
2200	17000	2600	20000	1600	2200
2645	21200	3135	25300	2000	2645

۴. نتایج

شرایط مربوط به محاسبه و قیمت‌گذاری تلفات و انرژی تلفات هارمونیک سالیانه به صورت ذیل است:
 میزان اعوجاج هارمونیک جریان عبوری از ترانسفورماتور (THDI=28.9) در نظر گرفته شده است. تحلیل هارمونیک جریان عبوری در شکل (۲) نشان داده شده است.



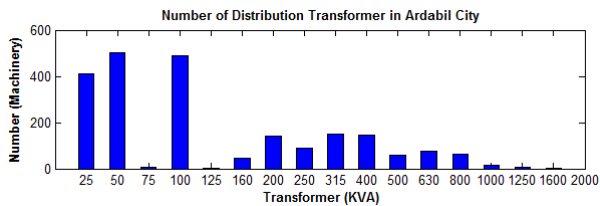
شکل ۱: فلوچارت محاسبه تلفات و انرژی سالیانه هارمونیک

جدول ۱: تابع تصحیح به دلیل اثرات متقابل میدان

h	1	3	5	7	9	11	13	15
k_h	1.09	0.89	0.58	0.39	0.29	0.24	0.22	0.21

جدول ۳: انرژی و هزینه سالیانه تلفات آلودگی هارمونیک ترانسفورماتور

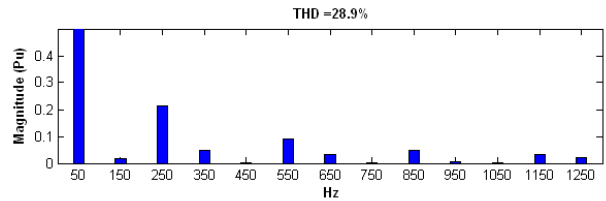
ترانسفورماتور کلاسیک		ترانسفورماتور AB'		ظرفیت (KVA) THDI=28.9%
هزینه سالیانه (ریال)	تلفات انرژی (KWH)	هزینه سالیانه (ریال)	تلفات انرژی (KWH)	
774718	397	664044	341	25
1262504	647	1020660	523	50
1643714	843	1334647	684	75
2024925	1038	1647813	845	100
2397937	1230	1893756	971	125
2918515	1497	2233976	1146	160
3402201	1745	2627483	1347	200
3976067	2039	3098873	1589	250
4738488	2430	3668639	1881	315
5681267	2913	4385971	2249	400
6722422	3447	5185283	2659	500
8116095	4162	6304320	3233	630
9960662	5108	7911143	4057	800
12051172	6180	9755710	5003	1000
14838517	7609	12239727	6277	1250
18527651	9501	15740306	8072	1600
23311229	11954	19555690	10029	2000



جدول ۵: فراوانی ترانسفورماتورهای توزیع در شهرستان اردبیل [۱۲]

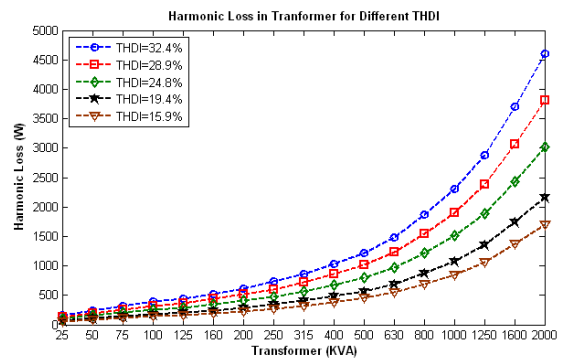
جدول ۴: تلفات هارمونیک ترانسفورماتورهای توزیع شهرستان اردبیل

ترانسفورماتور کلاسیک		فراوانی		ظرفیت (KVA) THDI=28.9%
هزینه تلفات (هزار ریال)	تلفات انرژی (KWH)	تلفات انرژی (KWH)	فراوانی (دستگاه)	
318175.65	397	411	25	
633348.3	647	502	50	
9863.1	843	6	75	
989784.9	1038	489	100	
4797	1230	2	125	
137200.05	1497	47	160	
479787.75	1745	141	200	
357844.5	2039	90	250	
710775	2430	150	315	
817970.4	2913	144	400	
383134.05	3447	57	500	
624924.3	4162	77	630	
627517.8	5108	63	800	
168714	6180	14	1000	
89025.3	7609	6	1250	
37053.9	9501	2	1600	
0	11954	0	2000	
6389916	62740	2201	جمع کل	

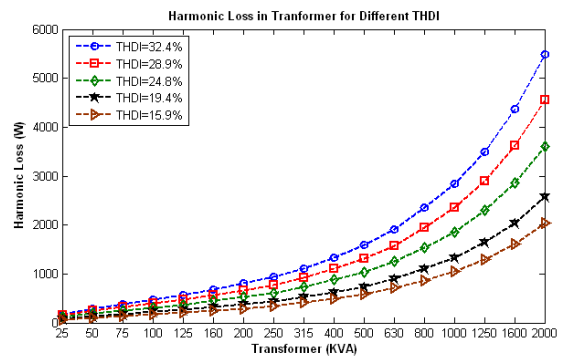


شکل ۲: آلودگی هارمونیک جریان شبکه

ضریب تلفات (ضریب بارگیری) ترانسفورماتور ($L_{SF} = 0.3$) و قیمت تمام شده تلفات هارمونیک ($0.05\$ = 1950\text{Rail}$) در نظر گرفته شده است. میزان تلفات هارمونیک در ترانسفورماتورهای کم تلفات و کلاسیک به ازای افزایش آلودگی هارمونیک جریان عبوری در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳: تلفات هارمونیک ترانسفورماتورهای کم تلفات AB'



شکل ۴: تلفات هارمونیک ترانسفورماتورهای کلاسیک

در جدول (۳) میزان هدر رفت انرژی سالیانه از بابت آلودگی هارمونیک جریان عبوری از ترانسفورماتور در هفده نوع از ترانسفورماتورهای توزیع نشان داده شده است.

منابع

- [1] Paul S. Moses; Mohammad A. S. Masoum; Keyue M. Smedley, Harmonic losses and stresses of nonlinear three-phase distribution transformers serving Plug-In Electric Vehicle charging stations, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES.
- [2] Mihail Digalovski ; Krste Najdenkoski ; Goran Rafajlovski, Impact of current high order harmonic to core losses of three-phase distribution transformer, EUROCON, 2013 IEEE.
- [3] M. Shareghi; B. T. Phung; M. S. Naderi; T. R. Blackburn; E. Ambikairajah, Effects of current and voltage harmonics on distribution transformer losses, 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.
- [4] Bin Zhang; Yong Liu; Kuo Zhao; Chuan Jiang; Zhan-long Zhang, Transformer loss calculation and analysis driven by load harmonic, 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering
- [5] Mohammad Yazdani-Asrami; Mohammad Mirzaie; Amir Abbas Shayegani Akmal, Investigation on impact of current harmonic contents on the distribution transformer losses and remaining life, 2010 IEEE International Conference on Power and Energy.
- [6] D. M. Said; K. M. Nor; M. S. Majid, Analysis of distribution transformer losses and life expectancy using measured harmonic data, Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010.
- [7] Themistoklis D. Kefalas; Antonios G. Kladas, Harmonic Impact on Distribution Transformer No-Load Loss, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010.
- [8] IEEE Tutorial Course Power System Harmonics. 84 EH0221-2-PWR
- [9] A.E. Emanuel; M. Yang; D.J. Pileggi, The engineering economics of power systems harmonics in subdistribution feeders: a preliminary study, IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 6, Issue: 3, 1991.
- [10] Mohamed Ashour, Kamelia Youssef, Salah El Sobki, The Cost of Harmonic Losses and Mitigations in Distribution Systems, 18th International Conference on Electricity Distribution, 2005.
- [11] Iran-Transfo Company website, "www.iran-transfo.com".
- [12] Ardabil Province Power Distribution Company website, "www.aped.com".

همانطوریکه در جدول (۴) نشان داده شده است در شهرستان اردبیل با مجموع کلی 2201 دستگاه ترانسفورماتور توزیع، تقریباً 6.389 میلیارد ریال ضرر و زیان ناشی از بهره‌برداری ترانسفورماتورها در محیط هارمونیک به بدنه شرکت وارد شده است.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله تلفات ناشی از عبور جریان با مولفه هارمونیک در هفده نوع از ترانسفورماتورهای توزیع کم تلفات 'AB و ترانسفورماتورهای کلاسیک تخمین و آنالیز گردید. همچنین هزینه‌های ناشی از تلفات هارمونیک در ترانسفورماتورهای با قیمت تمام شده انرژی به ازای 0.05\$/KWH یا 1950Riyal/KWH محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد به دلیل فراوانی ترانسفورماتورهای توزیع در شبکه، ضرر و زیان اقتصادی ناشی از تلفات هارمونیک رقم قابل ملاحظه‌ای است. بنابراین لازم است در جهت کاهش اینگونه تلفات راهکارهای مناسب در نظر گرفته شود.