



روش تضعیف هارمونیکهای معین برای اینورترهای قدرت براساس الگوریتم ژنتیک

محمدحسین خبازی mohammad_khabbazi@yahoo.com
طاہر نیکنام niknam@sutech.ac.ir
مجید سعیدی Majid_s2000@yahoo.com

کارشناسی ارشد
استاد گروه برق
استاد گروه برق
دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات (کهگیلویه و بویراحمد)

چکیده - در اینورترهای ولتاژ متوسط توان بالا که مناسب ترین گزینه برای اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه می باشند، شکل موجی با کیفیت بالا و حداقل میزان هارمونیکها در سمت ac مورد انتظار است. از طرف دیگر، بایستی تعداد کلیدزنیهای اینورتر به منظور پایین نگه داشتن فرکانس کلیدزنی آن، تا حد امکان کم باشد. روش شناخته شده حذف هارمونیکهای معین (SHE) قادر است هارمونیکهای از پیش تعیین شده را از سمت ac اینورتر بطور کامل حذف نماید. ولی اخیراً روش مدولاسیونی تحت عنوان روش تضعیف هارمونیکهای معین (SHM) معرفی شده است که قادر است تحت فرکانس کلیدزنی یکسان نسبت به روش حذف هارمونیکهای معین تعداد بیشتری هارمونیک را تحت تاثیر قرار دهد. در این مقاله، پیاده سازی روش تضعیف هارمونیکهای معین با استفاده از الگوریتم قدرتمند ژنتیک به انجام رسیده است. در مطالعه انجام گرفته، مقادیر مجاز برای هارمونیکها از استانداردهای EN50160 و CIGRE C 4.07 استخراج شده اند. برای تحقیق کارآمدی روش SHM با الگوریتم ژنتیک و همچنین اثبات برتری آن نسبت به روش SHE، شبیه سازیهایی در محیط MATLAB انجام گرفته اند. کلید واژه- تضعیف هارمونیکهای معین، حذف هارمونیکهای معین، اعوجاج هارمونیک کل

1-مقدمه

تقاضای فزاینده برای انرژی و گسترش روزافزون منابع تولید پراکنده به پیشرفتهای بزرگی در اینورترهای توان بالا و ولتاژ متوسط انجامیده است. از سوی دیگر بنا به قوانین سخت تر در حوزه کیفیت توان و پیدایش استانداردهای جدیدی که هارمونیکهای ولتاژ در شبکه را بیش از پیش محدود می نمایند، بایستی توجه خاصی به محدود کردن هارمونیکها معطوف شود. این مهم می تواند به دو طریق استفاده از فیلتر هارمونیک و یا بکار بردن یک روش مدولاسیون مناسب حاصل شود. روش شناخته شده حذف هارمونیکهای معین که در [1] معرفی شده است، از دیرباز برای محدود کردن اعوجاجهای هارمونیک در کاربردهای مختلف استفاده شده است [2,3]. در این روش، با استفاده از n کلیدزنی در یک شکل موج، تا $n-1$ هارمونیک را می توان حذف نمود.

علاوه بر تعداد محدود هارمونیکهای قابل حذف، انتقال انرژی هارمونیکهای حذف شده به هارمونیکهای بالاتر نیز از

معایب این روش می باشد [4,5].

اخیراً روش جدیدی برای بهبود اعوجاج هارمونیک معرفی شده است که بجای حذف کامل هارمونیکها، مقادیر آنها را به زیر مقادیر مجاز استاندارد تقلیل می دهد. روش تضعیف هارمونیکهای معین¹ (SHM) در [6] معرفی شد که در آن یک شکل موج با فرکانس کلیدزنی 750 هرتز برای تضعیف هارمونیکهای فرد غیر مضرب 3 از ولتاژ سمت اینورتر تا مرتبه 49 ام بکار رفته است. این کار برای برآورده کردن استاندارد WG 36-05 انجام گرفته است. مرجع [7] همان شکل موج مرجع [6] را به همراه یک حلقه کنترل بسته برای ثابت نگهداشتن ولتاژ خروجی تحت بار متغیر یا ولتاژهای لینک dc متغیر بکار برده است. این سیستم برای کاربردهایی مثل منابع تغذیه غیرمقطع² مناسب است.

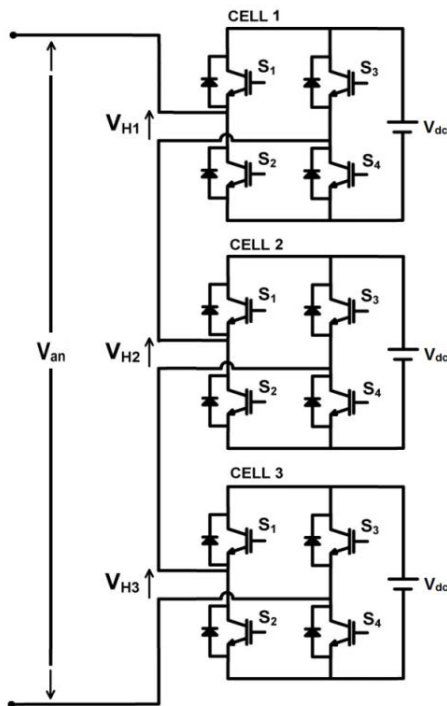
پیاده سازی روش SHM بر روی اینورتر با ولتاژهای نامساوی dc در مرجع [8] بررسی شده است. روش پیشنهادی از 10 کلیدزنی در هر ربع سیکل سیگنال ac

¹ Selective Harmonic Mitigation

² Uninterrupted Power Source (UPS)

مبدل CHB است.

یک مبدل CHB متشکل از سه سلول تمام پل در شکل 1 نشان داده شده است. با داشتن چنین مبدلی ساخت یک شکل موج هفت سطحی مطابق شکل 2 با حداقل فرکانس کلیدزنی برای سویچهای قدرت بکار رفته میسر خواهد بود. همانطور که مشاهده می گردد، در هر پریود از شکل موج هر یک از کلیدهای قدرت تنها یکبار روشن و خاموش می شوند که به این صورت، فرکانس کلیدزنی هر یک از آنها برابر 50 هرتز خواهد بود. با داشتن چنین شکل موجی که در هر ربع سیکل دارای 3 کلیدزنی است، می بایستی ملزومات استانداردهای EN50160 و CIGRE C 4.07 که در جدول 1 آورده شده اند برآورده شود.



شکل 1- اینوتر سه سلوله تمام پل متوالی

استفاده کرده و هارمونیکها را طوری تضعیف می نماید که استاندارد WG 36-05 برآورده شود.

در [5]، مقایسه ای بین روش مرسوم حذف هارمونیکهای معین و روش جدید تضعیف هارمونیکهای معین انجام گرفته است. طبق نتایج این مطالعه، روش جدید هم از نقطه نظر تعداد هارمونیکهای تحت تاثیر قرار گرفته و هم از نظر اعوجاج هارمونیک کل³ نسبت به روش حذف هارمونیکهای معین برتری دارد.

در این مقاله، روش تضعیف هارمونیکهای معین بر روی اینوترهای توان بالا با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل معادلات پیاده سازی شده است. در روش پیشنهادی، سعی بر آن است که ملزومات هر دو استاندارد EN50160 و CIGRE C 4.07 برآورده شوند. همچنین در حل معادلات علاوه بر هارمونیکهای فرد غیر مضرب 3، هارمونیکهای مضرب 3 نیز در نظر گرفته شده اند تا اگر روش پیشنهادی بجای سیستم سه فاز بر روی سیستم تکفاز بکاررود، مشکلی از نقطه نظر هارمونیکهای مضرب 3 وجود نداشته باشد.

در روش پیشنهادی همچنین یک سیستم کنترل حلقه بسته به ولتاژ خروجی کمک کی نماید تا تحت شرایط بار متفاوت یا ولتاژهای لینک dc متغیر، ثابت بماند.

2- مدولاسیون و کنترل

2-1 روش مدولاسیون

اینوترهای قدرت معمولاً متشکل از مبدلهای چندسطحی می باشند، که ولتاژهای چندسطحی را در سمت ac خود تولید می نمایند. این مبدلها به سه دسته مبدل تمام پل متوالی⁴ (CHB)، نقطه خنثی مهارشده⁵ (NPC) و خازن شناور⁶ (FC) تقسیم می شوند [10]. ما روش پیشنهادی را بر روی مبدل تمام پل متوالی پیاده سازی خواهیم نمود ولی این اصلا بدان معنی نیست که روش پیشنهادی محدود به

³ Total Harmonic Distortion (THD)

⁴ Cascaded H-Bridge

⁵ Neutral Point Clamped

⁶ Flying Capacitor



زیر خواهند بود:

$$\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3)$$

$$-Ma = 0, Ma = \frac{\pi V_{dc}}{4V_{dc}}, 0 \leq Ma \leq 3$$

$$\cos(m\theta_1) + \cos(m\theta_2) + \cos(m\theta_3) = 0$$

$$m = 5, 7 \quad (2)$$

که در آن Ma اندیس مدولاسیون و V_{dc} ولتاژ هریک از لینکهای dc است. همانطور که دیده می شود، روش SHE سعی بر آن دارد که اندازه هارمونیک اصلی را کنترل نموده و دو هارمونیک دیگر را به صفر برساند.

با استفاده از همان شکل موج، معادلات برای روش جدید تضعیف هارمونیکهای معین بصورت زیر خواهد بود:

$$|H_1 - Ma| \leq L_1$$

$$\frac{4V_{dc}}{m\pi} (\cos(m\theta_1) + \cos(m\theta_2) + \cos(m\theta_3))$$

$$\leq |H_1| L_m$$

$$m = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25$$

(3)

که در آن L_m ماکزیمم مقدار مجاز برای هارمونیک m ام می باشد و H_1 مقدار هارمونیک اصلی است. لازم به ذکر است که از شکل 2، مقدار هارمونیک h ام بصورت زیر در می آید:

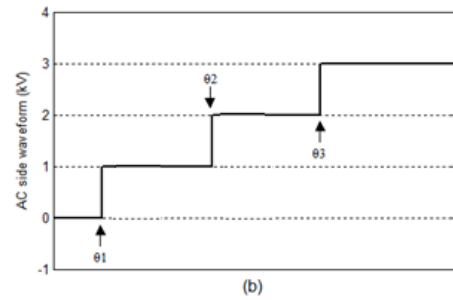
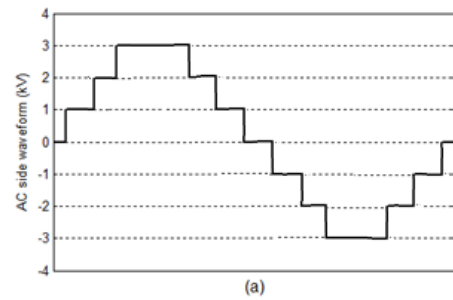
$$H_i = \frac{4V_{dc}}{i\pi} (\cos(i\theta_1) + \cos(i\theta_2) + \cos(i\theta_3))$$

(4)

همانطور که قبلا هم اشاره شد و از رابطه 3 نیز مشخص است، روش تضعیف هارمونیکهای معین بجای صفر کردن مقدار هارمونیکها، سعی بر آن دارد که مقدار مجاز هارمونیکها را به زیر مقادیر مجاز اشاره شده در استانداردها برساند.

برای حل معادلات بالا روشهای متفاوتی می توانند استفاده شوند- [6] [11]. در این مقاله از الگوریتم قدرتمند ژنتیک برای این منظور اشاره شده است. معادلات 3 با روش ژنتیک حل شده و برای بازه اندیس مدولاسیون 1.4 تا 2.8 پاسخ برای تضعیف هارمونیکهای معین به زیر مقادیر استاندارد مورد نظر در جدول 1 بدست آمده است.

شکل 3 پاسخ معادلات را نشان می دهد.



شکل 2- شکل موج تولیدی در سمت ac اینورتر الف) در یک پریود ب) در یک ربع سیکل

سطح ولتاژ	1 to 35 kV
مرتبه هارمونیک	حداکثر مقدار مجاز %
3	5
5	6
7	5
9	1.5
11	3.5
13	3
15	0.5
17	2
19	1.5
21	0.5
23	1.5
25	1.5
$h > 25$	عدد خاصی مورد نظر نمیباشد
THD	8%

جدول 1- ملزومات ولتاژ ac از دید استانداردهای EN50160 و CIGRE C 4.07

چالش اصلی در هر دو روش مدولاسیون SHE و SHM، حل معادلات و بدست آوردن نواحی جواب معادلات غیرخطی آنهاست. معادله کلی شکل موج شکل 2 (منتجه از تحلیل فوریه آن) عبارتست از:

$$V = \sum_{m=odd} \frac{4V_{dc}}{m\pi} (\cos(m\theta_1) + \cos(m\theta_2) + \cos(m\theta_3)) \quad (1)$$

که در آن V_{dc} ولتاژ لینک dc است. با استفاده از روش مرسوم SHE، و با داشتن 3 کلیدزنی در هر ربع سیکل، حداکثر دو هارمونیک می توانند از سمت ac حذف گردند. در این حالت، معادلات SHE بصورت



MATLAB/SIMULINK انجام گرفته است. جدول

2 پارامترهای سیستم شبیه سازی شده را نشان می دهد.

شکلهای 6 و نتایج روش SHM را در بهترین و بدترین حالت در بازه 1.4 تا 2.8 از نقطه نظر THD شکل موج بدست آمده را نشان می دهند.

شکل 5 بهترین حالت عملکردی را نشان می دهد. در این حالت مقدار THD شکل موج ac کمترین مقدار در تمام طول بازه مذکور است. شکل 5 همچنین مقایسه روش SHM با روش مرسوم SHE را در همان نقطه نشان می دهد. مشاهده می گردد که روش SHE نسبت به روش SHM هم از نقطه نظر تعداد هارمونیکهای تحت تاثیر قرار گرفته و هم از نقطه نظر THD ارجحیت دارد.

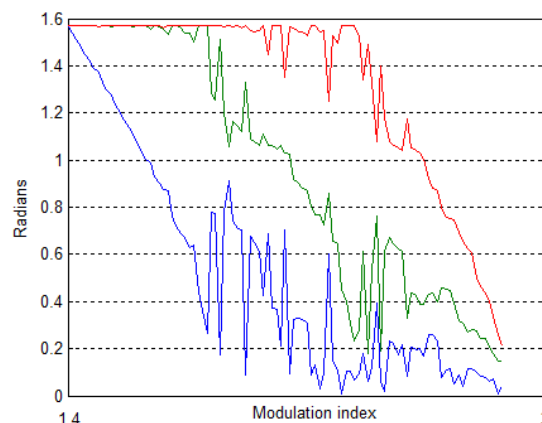
عکس حالت قبل، در شکل 6 اینبار برای بدترین جواب روش SHM از نظر THD شکل موج پاسخها آورده شده اند. مشاهده می شود که حتی در بدترین حالت خود، روش SHM از روش SHE میزان THD کمتری دارد.

4. نتیجه گیری

در این مقاله، پیاده سازی روش تضعیف هارمونیکهای معین بر روی اینورترهای قدرت با استفاده از متد ژنتیک بررسی شد. مقادیر استاندارد برای هارمونیکها از دو مرجع EN50160 و CIGRE C 4.07 استخراج شده اند. برای کارآمد بودن روش پیشنهادی بر روی اینورترهای تکفاز و سه فاز، هارمونیکهای مضرب سه نیز در مسئله گنجانده شده اند. با استفاده از حلقه کنترل بسته، ولتاژ خروجی تحت بارهای متغیر و لینکهای dc متغیر ثابت نگهداشته شده است.

5. مراجع

- [1] [H.S. Patel, R.G. Hoft: Generalised techniques of Harmonic Elimination and voltage control of thyristor inverters: Part I-Harmonic Elimination, IEEE Transactions on IndustryApplications, vol. IA-9,no.3, May/June 1973, pp.310-317
- [2] Napoles, J.; Leon, J.I.; Portillo, R.; Franquelo, L.G.; Aguirre, M.A.; , "Selective Harmonic Mitigation Technique for High-Power Converters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.57, no.7, pp.2315-2323, July 2010
- [3] Franquelo, L.G.; Napoles, J.; Guisado, R.C.P.; Leon, J.I.; Aguirre, M.A.; , "A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.54, no.6, pp.3022-3029, Dec. 2007
- [4] Napoles, J.; Portillo, R.; Leon, J.I.; Aguirre, M.A.; Franquelo, L.G.; , "Implementation of a closed loop SHMPWM technique for three level converters," *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE* , vol., no., pp.3260-3265, 10-13 Nov. 2008
- [5] Napoles, J.; Leon, J.I.; Franquelo, L.G.; Portillo, R.; Aguirre, M.A.; , "Selective harmonic mitigation technique for

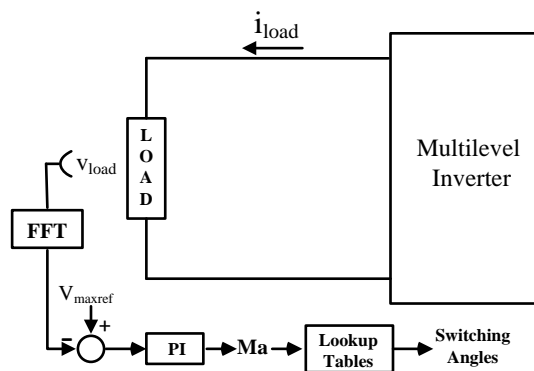


شکل 3- زوایای 01 تا 03 برحسب اندیس مدولاسیون

قابل توجه است که با بالا رفتن تعداد کلیدزنیهای شکل موج ac (برای نمونه در اثر افزایش فرکانس کلیدزنی یا بالاتر رفتن تعداد سطوح مبدل) درجه آزادی برای تضعیف هارمونیکها بالاتر رفته و می توان هارمونیکها را بیش از پیش تضعیف نمود. همچنین در اینصورت بازه های از اندیس مدولاسیون که برای آنها هارمونیکها بطور رضایت بخشی حذف شده اند افزایش می یابد.

2-2 سیستم کنترل

یک سیستم کنترل حلقه بسته برای کنترل اندازه ولتاژ خروجی تحت بارها و ولتاژهای dc متغیر بکار گرفته می شود. شمای کلی سیستم کنترل در شکل 4 نشان داده شده است. در این سیستم، ولتاژ ac سمت مبدل اندازه گیری شده و توسط یک بلوک FFT، اندازه هارمونیک اصلی آن محاسبه شده و سپس این مقدار با ولتاژ مرجع مقایسه شده و نتیجه به یک کنترلر PI داده می شود تا اندیس مدولاسیون مناسب تولید گردد.



شکل 4- دیاگرام سیستم کنترل حلقه بسته

3- نتایج شبیه سازی

برای تحقیق عملکرد روش پیشنهادی، شبیه سازیهایی در محیط

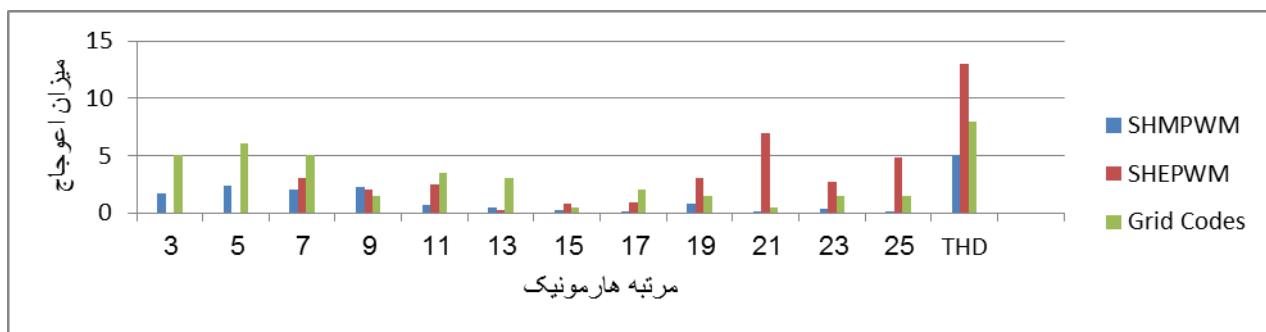


(MOPSO)," *Swarm Intelligence Symposium, 2003. SIS '03. Proceedings of the 2003 IEEE* , vol., no., pp. 26- 33, 24-26 April 2003

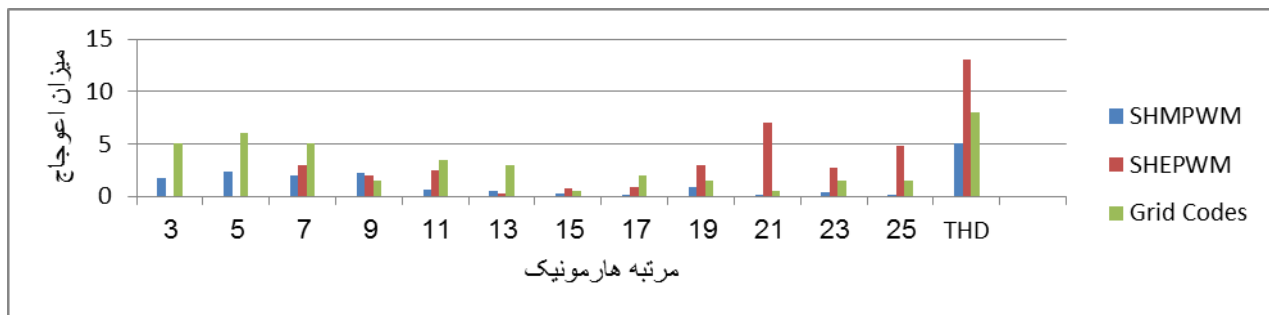
- [10] Zhang, L.B.; Zhou, C.G.; Liu, X.H.; Ma, Z.Q.; Ma, M.; Liang, Y.C.; , "Solving multi objective optimization problems using particle swarm optimization," *Evolutionary Computation, 2003. CEC '03. The 2003 Congress on* , vol.4, no., pp. 2400- 2405 Vol.4, 8-12 Dec. 2003
- [11] Xiaohui Hu; Eberhart, R.C.; Yuhui Shi; , "Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization," *Swarm Intelligence Symposium, 2003. SIS '03. Proceedings of the 2003 IEEE* , vol., no., pp. 193- 197, 24-26 April 2003

multilevel cascaded H-bridge converters," *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE* , vol., no., pp.806-811, 3-5 Nov. 2009

- [6] Rodriguez, J.; Jih-Sheng Lai; Fang Zheng Peng; , "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.49, no.4, pp. 724- 738, Aug 2002
- [7] Ahmadi, D.; Ke Zou; Cong Li; Yi Huang; Jin Wang; , "A Universal Selective Harmonic Elimination Method for High-Power Inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on* , vol.26, no.10, pp.2743-2752, Oct. 2011
- [8] Kennedy, J.; Eberhart, R.; , "Particle swarm optimization," *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on* , vol.4, no., pp.1942-1948 vol.4, Nov/Dec 1995
- [9] Mostaghim, S.; Teich, J.; , "Strategies for finding good local guides in multi-objective particle swarm optimization



شکل 5- مقادیر هارمونیکها برای بهترین حالت



شکل 6- مقادیر هارمونیکها برای بدترین حالت