انتخاب بهینه زوایای سوئیچینگ در تکنیک کنترل عرض پالس (PWM) در سیستمهای قدرت

سیدکمال‌الدین نیکروش

استاد دانشکده مهندسی برق ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

جلال نظرزاده

دانشجوی کارشناسی ارشد قدرت، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده :

درحال حاضر برای دستیابی به یک فرم سینوسی در مدارات اینورترمستقل قدرت، از تکنیکهایی نظیر حذف هارمونیک استفاده می‌گردد. دراین روشها مجموع دامنه مؤثر هارمونیکهای خروجی در دو سر مصرف بدون توجه به نوع سیستم مقدار بزرگی را دارا می‌باشد. دراین مقاله سعی گردیده‌است یک روش بهینه برای حداقل نمودن توزیع هارمونیکی فوق باانجام سوئیچینگ درزمان مناسب بدست آورده شود.

انجام سوئیچینگ مناسب باعث کاهش دامنه هارمونیکهای ناخواسته جریان در شبکه‌های قدرت گردیده و پایداری شبکه‌های متصل به این مصارف قدرت را بهبود می‌بخشد.

OPTIMAL SELECTION OF PWM FIRING ANGLES FOR POWER SYSTEMS APPLICATIONS

K.Nikravesh

Prof. of Elec. Eng. Dept. of Amirkabir University of Tech.

J.Nazarzadeh

Post graduate student of Elec. Eng. Dept. of Amirkabir University of Technology

ABSTRACT:

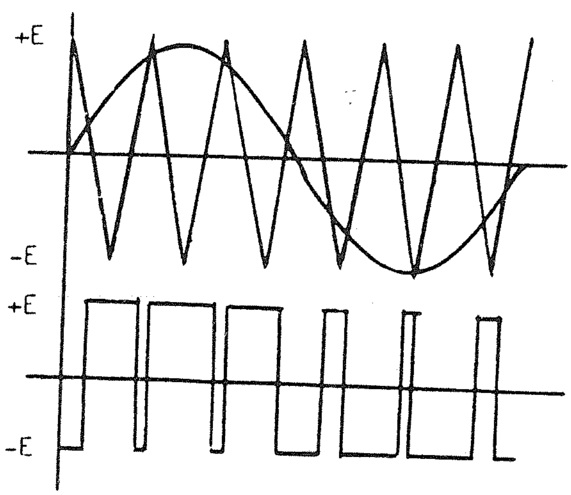
So far, in order to obtain a sinusoidal inverter output, harmonic elimination technic and ..., are used. Using these technics, the output rms amplitude of the harmanics on the load would be high. In this paper the optimal switching times for a PWM system are determined in order to minimize the harmonic distortions. Minimizing the harmanics' amplitude, will minimaze their corresponding current components which itself will improve the network stability.

مقدمه :

ایده کلی درتمام روشهای متداول به‌این منوال است که باانجام سوئیچینگ درزمانهای مناسب، یک فرم سینوسی در دوسر مصرف بدست آید.درابتدای امر، سوئیچینگ به صورت مربعی صورت می پذیرفت که درآن صورت دامنه هارمونیکهای ناخواسته به نسبت مرتبه خود تنزل می‌نمود، یابه عبارت دیگر $U_{(n)}=U/n$ [4]. در عمل سیستمی که با ولتاژی به فرم مربعی تغذیه شده باشد،دارای ناهنجاری در فرم خروجی خواهد بود. لذا برای گریز ازاین امر نسبت به کاهش این ناهنجاریها مطالعات وسیعی صورت پذیرفت که به روشهای مختلفی منجر گردید. در یکی از این روشها با انجام سوئیچینگ اضافی در مقایسه با روش فوق الذکر،دامنه تعدادی از هارمونیکها را کاهش می‌دهند. دراین مقاله سعی گردیده است که بااستفاده ازتکنیک فوق مناسبترین الگوی زمانی سوئیچ کردن برای داشتن کوچکترین توزیع هارمونیکی بدست آورده‌شود.ضمناً نتایج بدست آمده بانتایج حاصل ازکاربرد روشهای متداول قبلی مقایسه گردیده‌است .

۱) بررسی تکنیکهای موجود:

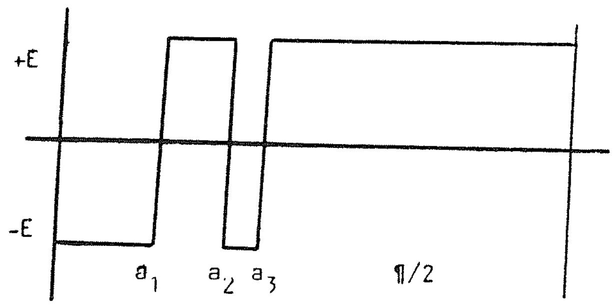
درروش متعارف PWM (Conventional PWM) زمانهای سوئیچ از مقایسه یک سوئیچ با یک موج مثلثی بدست می‌آید،باافزایش یا کاهش دامنه موج سینوسی،دامنه هارمونیک اصلی متناسب با آن تغییر کرده و لذا درخروجی با فیلتر کردن موج مزبور می‌توان یک موج سینوسی با دامنه معین بدست آورد. واضح است که دامنه ماکزیمم دراین روش برابر E_{max} می‌باشد.



شکل ۱. شکل پالس در روش متعارف

۲) روش حذف هارمونیک PWM:

دراین روش (Harmonics cancelling PWM) با توجه به عملکرد سیستم، زمانهای سوئیچ چنان انتخاب می‌گرددکه دامنه برخی از هارمونیکها با توجه به نیاز،به مقدار معینی محدود و یا صفر گردد. [1] اگر بسط فوریه موج نوشته شود مشاهده می‌شودکه به‌ازاء هرزاویه سوئیچ،می‌توان نسبت به کنترل یا محدود کردن دامنه یکی از هارمونیکها اقدام نمود. به عبارت دیگر به ازاء هر زاویه سوئیچ می‌توان دامنه یک هارمونیک را کنترل نمود. اگرشکل (۲) بیانگر سوئیچ در مدار قدرت باشد بسط فوریه آن،باتوجه به متقارن و فرد بودن موج به صورت زیر است :



شکل ۲. موج h.c.PWM در یک چهارم پریود

$$f(t)=\Sigma b_n \sin wnt \qquad (۱)$$

$$b_n = \frac{4E}{n\pi}\,(\,2 \operatorname{Cos} wna_1 - 2 \operatorname{Cos} wna_2 + 2 \operatorname{Cos} wna_3 - 1\,) \qquad (۲)$$

n= فرد

$b_n=0$ n= زوج

روابط فوق در تکنیک C.PWM نیز صادق می‌باشد. با توجه به اشکال ۱ و ۲ می‌توان به سادگی دریافت که تعداد سوئیچها اثری بر rms شکل موج فوق ندارد.

$$Erms = E = (\,\Sigma b^2 n/2\,)^{.5} = (\,b_1/2+b_3/2+...)^{.5} \qquad (۳)$$

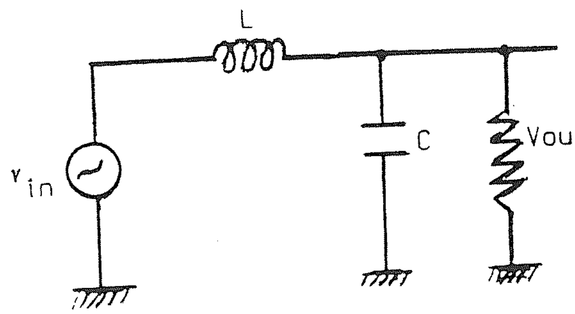
از رابطه فوق می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دامنه یکی از هارمونیکها با کاهش دامنه گروهی دیگر از هارمونیکها باید همراه باشد. لذا درتکنیک h.c.PWM با صفر نمودن بطور مثال دامنه هارمونیک ۳ و ۵ ، دامنه هارمونیکهای ۷و۹ و... نسبت به حالت قبل افزایش خواهدداشت بطوری که مجموع دامنه های فوق E گردد.

روشن است که حذف هارمونیکهای مراتب بالاتر بسیار ساده‌تر

از حذف هارمونیکهای مراتب پایین خواهد بود به‌این معنی که بااستفاده ازیک فیلتر ساده‌تر می‌توان هارمونیکهای مراتب بالا و بزرگ را ساده‌تر از هارمونیکهای مراتب پایین ولی کوچک حذف نمود.

۳) مقایسه روشهای موجود :

سئوالی که دراین جا مطرح می‌گردد،این است که کدام یک ازروشهای C.PWM و یا H.C.PWM و یا روشی دیگر،کمترین مقدار مؤثر دامنه هارمونیکهای ناخواسته را به دنبال خواهد داشت، هدف کلی دراین جا بدست آوردن a_1، a_2، a_3 به گونه‌ای است که اگر از فیلتر خاصی استفاده شود، کمترین RMS هارمونیکهای ناخواسته را در دو سر مصرف ایجاد کند.
در اینجا فیلتر مورد نظر یک فیلتر Lc و مصرف یک بار اُهمی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مدار شکل (۳) برای تحریک سینوسی داریم :



شکل ۳. یک فیلتر میان‌گذر

$$Vout = Vin/((1 - W^2Lc)^2 + L^2W^2/R^2)^{.5} \qquad (۴)$$

و ازآنجاکه ولتاژ اعمال شده به فیلتر فوق دارای هارمونیکهای مراتب بالایی است رابطه فوق به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Vout(R) = \frac{Vin(n)}{((1 - n^2W^2Lc)^2 + n^2L^2W^2/R^2)^{.5}} \qquad (۵)$$

همانطور که‌اشاره گردید هدف، ثابت ماندن دامنه هارمونیک اصلی به‌اندازه E و حداقل شدن مجموع دامنه مؤثر هارمونیکهای ناخواسته می‌باشد لذا $b_1=E$ وباتوجه به رابطه (۳)و(۵) و با منظور نمودن iبه جای 2i+1 و حذف هارمونیک اصلی به خاطر مطلوب بودن دامنه آن به رابطه زیر می‌رسیم:

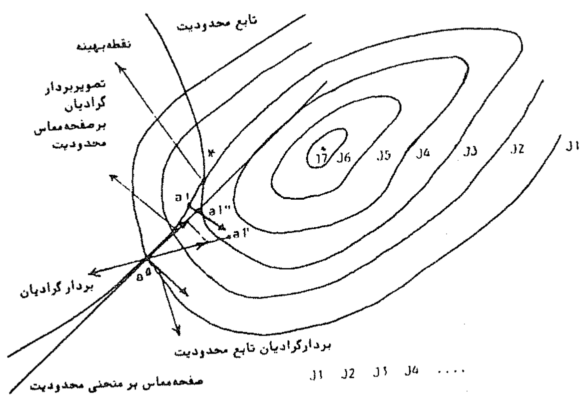
$$J = \Sigma\left[4E/(\pi(2i+1))^2 \frac{[2\,Cos((2i+1)wa_1)}{[(1-(2i+1)^2LCW^2)^2}\right.$$

$$\frac{-2Cos((2i+1)wa_2)+2Cos((2i+1)wa_3-1]^2}{+L^2W^2(2i+1)^2/R^2]} \qquad (٦)$$

و با توجه به روابط فوق a_1، a_2، a_3 باید چنان انتخاب شوند که اولاً $b_1 = E$ شده درضمن مقدار J حداقل خود را دارا باشد.
قابل توجه است‌که دامنه هارمونیکهای مراتب بالاتر از حد معینی به بعد، اثر زیادی در مقدار J ندارند لذا برای انجام محاسبات، مجموع چندین هارمونیکهای اول درنظر گرفته می‌شود. اگر برای حل معادلات فوق از روش ضرب کننده لاگرانژ استفاده گردد، به علت مثلثاتی بودن تابع هزینه، محاسبات پیچیده و غیرمناسب خواهدبود.
استفاده ازبرخی روشهای کلاسیک دیگر نظیر روش سریعترین سقوط ، روش پاول و غیره نیز اغلب بااشکالات متفاوتی برخورد می‌کنند.

۴) ادامه روش جدید:

این روش برمبنای تصویر گرادیان با محدودیت معادله‌ای غیرخطی استوار می‌باشد. اگر فرض گردد که تابعی چند متغیره J در صفحه مختصات مربوطه دارای منحنی‌های هم‌تراز شکل(۴) بوده و منحنی تابع محدودیت در نقطه * به یکی از این منحنی ها مماس گردد، این نقطه یک حداقل برای تابعی J بطوری که محدودیت مربوطه را نیز برآورده نماید،می‌باشد.



شکل ۴. منحنیهای هم‌تراز و منحنی محدودیت

باید توجه گرددکه حداقل تابعی J برای حالت بدون محدودیت مقدار J_7 می‌باشد،لیکن درهنگام وجودتابع محدویت ،اولین نقطه‌ای که تابع محدودیت برتابعی هزینه مماس گردد، آن نقطه یک حداقل برای J به‌ازاء محدودیت موردنظر خواهدبود.
دراین روش باید فقط روی منحنی محدودیت حرکت کرد وبه نقطه حداقل رسید،درحالی که درروشهای قبل این مسأله وجودنداشت. فرض درابتدا درنقطه a^o قرار داریم اگر با توجه به

روش سریعترین سقوط حرکت گردد بایستی در جهت خلاف گرادیان حرکت کرد تا به نقطه a'^1 رسید همانطور که مشاهده میگردد این حرکت باعث دور شدن از محدودیت بوده و برای حرکت روی محدودیت بایستی ابتدا برداریکه گرادیان تابع محدودیت را در نقطه a^o مشخص می‌کند و سپس معادله کلیه سطوحی که ازنقطه مزبور عبور می‌نمایند وبرتابع محدودیت مماسند، بدست آورد.

برای حرکت درجهت کاهش J و روی تابع محدودیت به طریق ذیل عمل می‌شود. درابتدا تصویر بُردار عکس گرادیان J را برروی صفحه مماس برتابع محدودیت بدست آورده ودرجهت آن تصویر،به‌اندازه t حرکت می‌کنیم تابه نقطه a''^1 برسیم. همانطور که ازشکل پیداست، این نقطه کمی ازتابع محدودیت دور شده برای بازگشت به تابع محدودیت ازروش ذیل استفاده می‌گردد:

اگر ازیک نقطه مشخص a''^1 بخواهیم مختصات نقطه مجهول a^1 را بدست آوریم،باتوجه به قضایای آنالیز بُرداری می‌توان به صورت زیر عمل نمود:

بُردار گرادیان واحد عبوری از نقطه a^1 و بُردار گرادیان حامل a^1,a''^1 را بدست آورده واگر a^1 متناظر باتصویر a''^1 برروی رویه مورد نظر باشد، در آن صورت این دو بُردار باید منطبق یا موازی با یکدیگر باشند ونیزنقطه مجهول a^1 درمعادله تابع محدودیت صدق نماید. ازروی این معادلات بدست آمده توسط دوشرط فوق می‌توان نقاط a^1 را ازروی a''^1 بدست آورد.

۵) کاربرد روش جدید درمسأله PWM:

همانطورکه قبلاً اشاره شد مجموع دامنه مؤثر هارمونیکها و ناخواسته از رابطه(۴) بدست می‌آید.

با توجه به اینکه $b_1=E$ می‌باشد داریم:

$$2\,\mathrm{Cos}Wa_1 - 2\,\mathrm{Cos}Wa_2 + 2\mathrm{Cos}Wa_3 - 1 = \pi/4 \qquad (۷)$$

بُردار واحد قائم برتابع محدودیت به صورت زیر خواهدبود:

$$S=(\mathrm{Sin}^2Wa_1+\mathrm{Sin}^2Wa_2+\mathrm{Sin}^2Wa_3)^{.5} \qquad (۸)$$

$$Q=(-\mathrm{Sin}Wa_1.I_{a1}+\mathrm{Sin}Wa_2.I_{a2}-\mathrm{Sin}Wa_3.I_{a3})/S \qquad (۹)$$

بُردار واحد عکس گرادیان به صورت کلی به شکل زیر خواهد بود.

$$gi=(\frac{dJ}{da_1}.I_{a1}+\frac{dJ}{da_3}.I_{a2}+\frac{dJ}{da_3}.I_{a3})/D \qquad (۱۰)$$

که در آن D برابر است با:

$$D=[(\frac{dJ}{dJ_1})^2+(\frac{dJ}{da_2})^2+(\frac{dJ}{da_3})^2]^{.5} \qquad (۱۱)$$

اگر زوایای بُردارهای گرادیان واحد gi,g بامحوری a_3,a_2,a_1 برابر x,y,z باشنددرآن صورت باتوجه به نحوه عمل روش فوق داریم:

$$x=-\frac{\pi}{2}-\mathrm{Cos}^{-1}(-\mathrm{Sinwa}_1/S)+\mathrm{Cos}^{-1}[(-dJ/da_1)/D] \qquad (۱۲)$$

$$y=-\frac{\pi}{2}-\mathrm{Cos}^{-1}(\mathrm{Sinwa}^2/S)+\mathrm{Cos}^{-1}[(-dJ/da_2)/D] \qquad (۱۳)$$

$$z=-\frac{\pi}{2}-\mathrm{Cos}^{-1}(-\mathrm{Sinwa}_3/S)+\mathrm{Cos}^{-1}[(-dJ/da_3)/D] \qquad (۱۴)$$

باتوجه به زوایای فوق نقطه a''^1 بادرنظرگرفتن نقطه قبلی از روابط زیر بدست می‌آید:

$$a''^{n+1}_1 = a_1^n - t\mathrm{Cos}\,x$$

$$a''^{n+1}_1 = a_2^n - t\mathrm{Cos}\,y \qquad (۱۵)$$

$$a''^{n+1}_3 = a_3^n - t\mathrm{Cos}\,z$$

و با روشی که بیان گردید ازروی a'''^{n+1} می‌توان a'^{n+1} را بدست آورد.

شرط موازی بودن بُردار گرادیان درنقطه a^{n+1} و بُردار حامل دونقطه a'^{n+1} و a''^{n+1} عبارت است از:

$$\frac{(a_1^{n+1}-a''^{n+1}_1)}{-\mathrm{Sin}Wa_1^{n+1}}=\frac{(a_2^{n+1}-a''^{n+1}_2)}{\mathrm{Sin}Wa_2^{n+1}}$$

$$=\frac{(a_3^{n+1}-a''^{n+1}_3)}{-\mathrm{Sin}Wa_3^{n+1}} \qquad (۱۶)$$

و از آنجایی که باید نقطه a^{n+1} درروی منحنی محدودیت باشد، لذا باید درآن معادله نیز صدق کند. یعنی :

$$2\mathrm{Cos}\,Wa_1^{n+1} - 2\mathrm{Cos}\,Wa_2^{n+1} + 2\mathrm{Cos}\,Wa_3^{n+1} - 1 = \frac{\pi}{4} \qquad (۱۷)$$

باتوجه به روابط (۱۶) و(۱۷) می‌توان a_1^{n+1} و a_2^{n+1} و a_1^{n+1} را با روش گوس سایدل بدست آورد.

درابتدا a^{n+1} و a''^{n+1} را برابر می‌گیریم و بعد از چندمرحله تکرار جوابهای واقعی بدست می‌آیند.البته دراین روش اندازه گام محاسباتی را بایدکنترل نمود زیرا افزایش بیش از حد t ممکن است باعث دورشدن از جواب واقعی گردد.بعد از بدست آورن a^{n+1} از روی a''^{n+1} با روش اشاره شده درقبل،آن قدراین عمل راتکرار می‌کنیم تا بُردار گرادیان حامل از نقطه موردنظر ازروی تابع محدودیت با بُردار عکس گرادیان از تابعی J هم سو گردد.درآن صورت آن مختصات یک حداقل برای تابعی J به‌ازاء تابع محدودیت موردنظر خواهدبود.

۶) مثال عددی:

برای یافتن نتیجه باروش اخیر ازمقادیر زیراستفاده می‌شود:

$l=۱۸$ mh $c=۷۲\,\mu f$ $R=۱۵$ Ohm $t=۳$ ms $W=۳۱۴$

مقدار n باتوجه به محاسبه دامنه هارمونیکها و با توجه به مقدار انحراف قابل قبول بدست می‌آید که‌دراین مثال $n=۵۱$ می‌باشد.

		a_1	a_2	a_3	$J\times10^{-3}$
Optimal	PWM(ms)	0.79	2.22	2.57	4.60
[1]H.C	PWM(ms)	0.93	2.58	2.86	6.57
[2]C.	PWM(ms)	0.66	3.20	3.43	59.67

۱ - زوایای فوق دراین روش ازحل دستگاه $b_s=0, b_3=0, b_1=1$ بدست آمده‌اند.

۲ - زوایای فوق باتوجه به شکل ۱ قابل محاسبه هستند.

۷) نتیجه :

بامقایسه بین مقادیر J بااستفاده ازسه روش مختلف مشاهده می‌گردد که روش بهینه نسبت به دو روش H.C.PWM,C.PWM دارای تابعی معیار کوچکتری می‌باشد.

مقایسه کلی بین سه روش فوق درجدول زیر بیان گردیده‌است:

۱ - ازنظرزمان محاسبه

Opt.PWM:۳ H.C.PWM:۲ C.PWM:۱

۲ - ازنظر سادگی ساخت پالس

Opt.PWM: H.C.PWM:۲ C.PWM:۱

۳ - ازنظرحداقل تابعی

C.PWM:۳ H.C.PWM:۲ Opt.PWM:۱

۴ - ازنظربزرگی فاصله ۲ سوئیچ

H.C.PWM:۳ C.PWM:۲ Opt.PWM:۱

منابع :

1. **Determination of Communation Sequence with a View to Eliminating Harmonics in Microprocessor-controlled PWM Voltage Inverter. By: A. Zuckerberger & Abraham Alexandrovitz, IEEE Transaction-Industrial Electronics, Vol.3, No:3, 1986.**
2. **A New Control PWM Inverter Waveform for Minimum Loss Operation of an Inductions Motor Drive. By: ISAO Takahashi & Hiroshi Mochikawa, IEEE Transactions Industry Application, Vol.1, No:4, 1985.**
3. **Optimal Plasewidth Modulation for Feeding AC Motor. By:Giusepps, Buja & Glov Anni B. Indri, IEEE Transactions on Industry Application, Vol.3, No:1, 1977.**
4. **Staircase PWM: An Uncomplicated and Efficient Modulation Technique for AC Motor Drives. By: Kjeld Thorborg & Ake Nystrom. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.3, No:4, October 1988.**
5. **Advanced Engineering Mathematics. By: Kreysizing, 1985.**