تعیین جهت و اندازه گردش هارمونیک در نقطه اتصال به شبکه قدرت

امیر فرخ پیام — بهزاد میرزائیان — مسعود حیرانی

دانشگاه صنعتی اصفهان — دانشگاه اصفهان — شرکت پژوهنده نیرو

amir_farokh@yahoo.com — mirzaeian@eng.ui.ac.ir — eprad@epradco.com

چکیده- در این مقاله، به بررسی روشهای عملی جهت تعیین و تشخیص اعوجاج ایجاد شده توسط یک مشترک در شبکه قدرت پرداخته و در ادامه روشی جهت تعیین جهت آلودگی غالب هارمونیکی در نقطه اتصال مشترک به شبکه ارائه می شود. کارآیی روش ارائه شده با شبیه سازی شبکه قدرت استاندارد IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با پیاده سازی روش ارائه شده بر روی داده های دستگاه *ION7600* که با نصب روی شبکه قدرت حاصل شده اند صحت این روش برای تعیین منبع غالب هارمونیک مورد بررسی قرار می گیرد. بررسی نتایج بدست آمده در این تحقیق و مقایسه آنها با روشهای دیگر نشان دهنده عملکرد مطلوب روش ارائه شده در تشخیص اندازه و جهت اعوجاج در سیستم قدرت است.

لغات کلیدی- بار سازگار و ناسازگار، تعیین جهت هارمونیک، دامنه های متناسب سیگنال، شاخص جهانی هارمونیک

۱- مقدمه

شکل موج توان الکتریکی در مرحله تولید به طور کامل سینوسی و عاری از هرگونه اعوجاجی است. بسیاری از وسایل مصرف کننده و تجهیزات الکتریکی فقط برای کار تحت شرایط ولتاژ سینوسی طراحی شده اند. بارهای الکتریکی زیادی نیز هستند که شکل موج را معوج می گردانند. این اعوجاج ها از طریق جریان هارمونیکی در تمام شبکه پخش می شوند. تعیین میزان مشارکت و سهم مصرف کننده از شکل موج معوج در نقطه اتصال به شبکه توجه زیادی را از طرف شرکتهای برق به خود معطوف کرده است. وجود مؤلفه های هارمونیکی جریان یکی از مسائلی است که موجب ایجاد اعوجاج ولتاژ در سیستم قدرت می شود، مواردی وجود دارد که وقوع اعوجـاج به صورت تصادفی رخ می دهد ولی اکثر اعوجاج ها پریودیک یا دائمی می باشند. منابع اصلی ایجادکننده هارمونیک ها در سیستم قدرت به موارد زیر دسته بندی می شوند:

۱- بارهای تجاری و مسکونی: مبدل های الکترونیک قدرت، کامپیوترها و تجهیزات اداری، لامپهای فلورسنت و کم مصرف و منابع تغذیه سوئیچینگ در دستگاههائی نظیر تلویزیون ها و مایکروویو.

۲- بارهای صنعتی: مبدل های سه فاز قدرت، درایوهای DC و AC، کوره های قوس و القایی و ترانسفورماتورها، موتورها و داریوها و ...

۳- بانکهای خازنی موازی و سلف های سری: بانکهای خازنی موازی که اکثراً برای تصحیح ضریب قدرت در سیستم قدرت استفاده می شوند اگر چه به طور مستقیم ایجادکننده هارمونیک نیستند ولی به تقویت هارمونیک ها کمک می کنند.

استانداردهای مختلفی برای سطوح مجاز اعوجاج جریان و ولتاژ همانند استاندارد IEEE519-1992 تدوین گردیده اند بر اساس این استانداردها تحلیل های آماری اندازه گیری

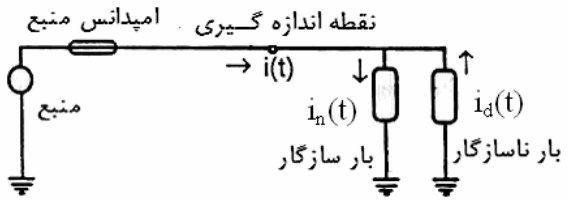
هارمونیک ها نیز پیشنهاد گردیده اند. هارمونیک ها، دلایل ایجاد آنها و روشهای اندازه گیری آنها در [۱] آمده است. استانداردهایی که محدوده ها را ذکر می کنند در [۲] آمده است. تحلیل های آماری اندازه گیری هارمونیک ها در [۳] ارائه شده است. [۴] با استفاده از دامنه های متناسب سیگنال روشی جهت تعیین سمت هارمونیک در نقطه اتصال به شبکه ارائه داده است. [۵] بر اساس تعریف جدیدی از بارها، روشی جهت جداسازی مشارکت هارمونیکی مشترک و مصرف کننده معرفی کرده است. در [۶] روشی جهت تعیین سمت آلودگی هارمونیکی و محاسبه سهم دو طرف نقطه اتصال در آلودگی پیشنهاد شده است. [۷] به بررسی شاخص های کیفیت توان پرداخته و شاخص HGI را که میزان آلوده کنندگی بار را مشخص می کند، مورد بررسی قرار داده است. در این مقاله بر اساس [۵] و با استفاده از مفهوم بارهای سازگار و ناسازگار ابتدا روشی جهت تعیین اعوجاج ایجاد شده توسط یک مشترک هنگامی که مشترکین دیگری در شبکه موجودند ارائه شده، سپس با استفاده از این روش و با توجه به اینکه روش فوق به جداسازی میزان آلودگی سمت بار و شبکه می پردازد، داده های لازم جهت تعیین میزان آلوده کنندگی بار بر اساس روش HGI بدست آمده و از آنها جهت تعیین HGI استفاده می گردد. در این تحقیق با توجه به روش ارائه شده در مقاله و با استفاده از داده های بدست آمده، جهت آلوده کننده غالب نسبت به نقطه اتصال مشترک به شبکه تعیین می گردد. در ادامه این تحقیق بر اساس استفاده از دامنه های متناسب سیگنالهای ولتاژ و جریان روشی ساده و عملی به منظور تعیین جهت آلودگی در نقطه اتصال مشترک به شبکه مورد بررسی قرار می گیرد. در پایان با شبیه سازی شبکه نمونه استاندارد IEEE و استفاده از نتایج تست عملی صحت عملکرد روش ارائه شده، مورد بررسی قرار می گیرد و با نتایج بدست آمده از روش [۸] مقایسه شده است. مهمترین مزیت روش دامنه های متناسب سیگنال که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد سادگی پیاده سازی آن در عمل و به خصوص سهولت کاربرد آن بر روی داده های نمونه برداری شده توسط دستگاههای موجود در کشور می باشد، چرا که نیاز به اندازه گیری زاویه فاز هارمونیکی ولتاژ و جریان را مرتفع می کند. علاوه بر این روش ارائه شده در این مقاله به منظور تعیین جهت آلودگی از طریق جداسازی میزان آلودگی و شاخص HGI، شاخصی معتبر بوده که هم به منظور تعیین جهت آلودگی و علاوه بر آن میزان آلوده کنندگی بار می تواند استفاده شود.

۲- تئوری مقاله

در این بخش مفهوم بار سازگار و ناسازگار، شاخص جهانی هارمونیک و روش دامنه های متناسب سیگنال بررسی شده و نحوه تعیین جهت انتشار آلودگی بر اساس مفهوم بارهای سازگار و ناسازگار، با استفاده از رابطه پیشنهادی ارائه می گردد.

۲-۱- قسمت های سازگار و ناسازگار یک بار

یک بار عموماً از قسمت های مختلف ناسازگار (اعوجاجی) و سازگار (غیراعوجاجی) تشکیل شده است که به آسانی می توانند به دو بار موازی مطابق شکل (۱) مدل شوند. جریان کلی اندازه گیری شده در نقطه اندازه گیری جمع جریانهای کشیده شده توسط قسمت سازگار و ناسازگار بار است. در محدوده فرکانسی آن قسمت از جریان که حاوی نرخ ثابتی از ولتاژ در کلیه فرکانس هاست، بخشی از جریان است که متعلق به قسمت سازگار بار می باشد و بخش دیگر قسمت ناسازگار بار است. محاسبات بر روی ولتاژ و جریان اندازه گیری شده در یک نقطه جهت جداسازی قسمتهای معوج و غیرمعوج در ادامه آمده است.



شکل (۱): مدلی از سیستم قدرت

۲-۲- جداسازی قسمت معوج

فرکانس نمونه برداری همزمان ولتاژ و جریان در نقطه اندازه گیری دو برابر بالاترین فرکانس موجود در سیگنال است. در این مقاله سیستم سه فاز متعادل عنوان مثال در نظر گرفته می شود. بسط این مفهوم برای حالت سه فاز نامتعادل نیز عملی است. $v(t)$ و $i(t)$ ولتاژ و جریان نمونه برداری شده در نقطه اندازه گیری در نظر گرفته

می شوند. $i_n(t)$ بخش سازگار جریان است که از منبع تغذیه به سمت مصرف کننده می رود و $i_d(t)$ بخش معوج جریان (ناسازگار) است که از سمت مصرف کننده به طرف منبع تغذیه می رود.

$I_d(j\omega), I_n(j\omega), V(j\omega), I(j\omega)$ تبدیلات فوریه متناظر برای جریان ها هستند.

$$i(t) = i_n(t) - i_d(t) \qquad (۱)$$

$$I(j\omega) = I_n(j\omega) - I_d(j\omega) \qquad (۲)$$

بخش غیرمعوج جریان با نرخ ثابت y در کلیه فرکانسها با ولتاژ مطابق فرمول زیر ارتباط دارد:

$$I_n(j\omega) = y.V(j\omega) \qquad (۳)$$

چون بار توان مؤلفه اصلی فرکانس را نمی تواند تولید کند، قسمت معوج جریان در فرکانس اصلی صفر است پس:

$$I_d(j\omega_1) = 0 \qquad (۴)$$

در این رابطه ω_1 مؤلفه اصلی فرکانس است. با جمع روابط (۳) برای ω_1 و (۴) داریم:

$$I_n(j\omega_1) + I_d(j\omega_1) = y.V(j\omega_1) \qquad (۵)$$

و مقدار y بدست می آید:

$$y = \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)} \qquad (۶)$$

با جایگذاری y از (۶) در (۳) بخش غیرمعوج جریان عبور کننده از سمت منبع تغذیه به مصرف کننده عبارت از:

$$I_n(j\omega) = \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)}.V(j\omega) \qquad \omega = \omega_1, \omega_2, \ldots \omega_n \qquad (۷)$$

رابطه جریان گذرنده از سمت منبع تغذیه به مصرف کننده می دهد:

$$I(j\omega) - I_n(j\omega) = I(j\omega) - \frac{I(j\omega_1)}{V(j\omega_1)}.V(j\omega) \qquad (۸)$$

$$\omega = \omega_1, \omega_2, \ldots \omega_n$$

با تعریف $I_d(j\omega)$ به عنوان جریان معوج که از سمت مصرف کننده به منبع جاری است $I_d(j\omega)$ عبارت است از:

$$I_d(j\omega) = I(j\omega_1)/V(j\omega_1).V(j\omega) - I(j\omega) \qquad (۹)$$

$$\omega = \omega_2, \ldots \omega_n$$

قابل ذکر است که بخش غیرمعوج از جریان گذرنده از منبع تغذیه به سمت مصرف کننده شامل مؤلفه اصلی و هارمونیک ها می باشد. جریان معوج گذرنده از مصرف کننده به منبع فرکانس اصلی را ندارد و فقط شامل هارمونیک هاست.

۲-۳- شاخص جهانی هارمونیک

شاخص جهانی هارمونیکی که اولین بار در [۹] ارائه گردید، به عنوان نسبت میان جریان های هارمونیکی I_L که مقدار آنها ارتباط مستقیمی با غیرخطی بودن بار دارد (متناظر با پخش توان اکتیو هارمونیکی از سمت بار به شبکه تغذیه می باشد) و I_S که با آلودگی موجود در ولتاژ تغذیه در ارتباط می باشد، به صورت زیر تعریف می گردد:

$$HGI = \frac{\left\|\underline{I_L}\right\|^2}{\left\|\underline{I_S}\right\|^2} \qquad (۱۰)$$

مقدار HGI، برای برای بارهای خطی و متعادل برابر صفر بوده، در حالی که با افزایش آلودگی و عدم تعادل بار افزایش می یابد. حال در این قسمت و با توجه به مفهوم HGI با استفاده از رابطه زیر می توان جهت انتشار آلودگی در نقطه اتصال مشترک به شبکه را تعیین نمود:

$$z = \frac{\left\|I_L\right\|^2}{\left\|I_{sh}\right\|^2} \qquad (۱۱)$$

که I_L بیانگر مجذور مربعات هارمونیک های جریان سمت بار که از طریق رابطه (۹) بدست می آیند، می باشد و I_{sh} مجذور مربعات هارمونیک های جریان سمت شبکه بدون احتساب مولفه اصلی جریان، که از طریق رابطه (۷) بدست می آیند می باشد. اینک از طریق رابطه (۱۱) می توان

جهت غالب آلودگی را مشخص نمود، بدین معنا که اگر مقدار z بزرگتر از یک بود بار عامل آلودگی و اگر کوچکتر از یک باشد شبکه عامل آلودگی خواهد بود می باشد. اگر مقدار z برابر یک باشد، بار و شبکه هر دو به یک میزان در ایجاد آلودگی هارمونیکی سهم دارند. قابل ذکر است که با توسعه این روش و انجام تحقیقات گسترده تر می توان با توجه به شاخص HGI و رابطه (۱۱) به سمت تعیین نوع آلودگی نیز پیش رفت.

۲-۴- روش دامنه های متناسب سیگنال

دامنه های متناسب سیگنال توجه به دامنه هارمونیک های مربوطه به عنوان درصدی از مؤلفه های ولتاژ و جریان را به عنوان امکانی جالب و ساده برای تشخیص جهت غالب هارمونیکی نسبت به نقطه اندازه گیری در نظر می گیرد. اگر مصرف کننده هارمونیک های اعمال شده توسط شبکه را تجربه کند آنگاه دامنه های مربوط به هارمونیک جریان کمتر یا برابر با دامنه هارمونیک ولتاژ مربوطه است. برای مثال اگر هارمونیک سوم ولتاژ ۳/۱٪ و هارمونیک سوم جریان ۲/۱٪ باشد آنگاه انتظار می رود که هارمونیک جریان نتیجه ولتاژ هارمونیکی خط شبکه باشد. به خاطر اینکه بار مصرف کننده نیز دارای مؤلفه راکتیو (اندوکتیو) است که امپدانس بالاتری را برای هارمونیک ها ایجاد می کند، انتظار می رود که هارمونیک جریان از هارمونیک ولتاژ که به صورت درصد بیان می شود کوچکتر باشد. به عبارتی آلودگی و هارمونیک موجود در ولتاژ شبکه موجب ایجاد آلودگی در جریان مشترک می گردد. اگر به هر دلیلی عکس این مطلب صحیح باشد، یعنی دامنه نسبی هارمونیک جریان از هارمونیک ولتاژ بزرگتر باشد آنگاه بار مصرف کننده، به شبکه هارمونیک تزریق می کند. دلیل این امر این است که امپدانس خط از امپدانس بار خیلی کوچکتر است. اگر چه این اثر در فرکانسهای بالا، کاهش می یابد، ولی انتظار می رود که این مطالب به خصوص در هارمونیک های پایین تر صحیح باشد. به علت رزونانس گاهگاهی امکان تأثیرات مبالغه آمیز هارمونیک ها وجود دارد، بنابراین باید همیشه به هارمونیک ها به عنوان یک گروه توجه شود. (ابتدا با تأکید ویژه و خاصی بر روی چند هارمونیک اول به خصوص مؤلفه های فرد از ۳ تا ۱۱) فرم محاسباتی این روش به طور مختصر به صورت زیر است:

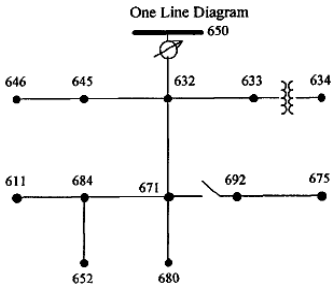
$$x_i = \frac{V_i}{V_1} \qquad (۱۲)$$

$$y_i = \frac{I_i}{I_1}$$

اگر $x_i \geq y_i$ در هارمونیک iام جهت هارمونیک نسبت به هارمونیک iام جهت هارمونیک نسبت به نقطه اندازه گیری غالب از طرف مشترک است.

۳- نتایج شبیه سازی

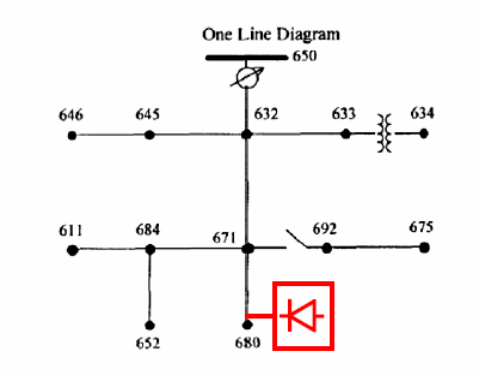
با مدلسازی شبکه تست ۱۳ گره IEEE که دیاگرام خطی آن در شکل (۲) نمایش داده شده، با استفاده از نرم افزار Pscad، بار آلوده کننده غیرخطی را در باس ۶۸۰ شکل (۲) قرار داده که شکل (۳) آن را نشان می دهد.



شکل(۲): دیاگرم تک خطی شبکه ۱۳ گره IEEE.

با اندازه گیری مقادیر لحظه ای مؤلفه های ولتاژ و جریان از یک فاز و هارمونیک های تا مؤلفه ۱۵ در باس ۶۸۰ نتایج جدول (۱) بدست آمد که با دقت بر مقادیر حاصله میزان جریان معوج از طرف شبکه و مشترک همچنین جهت غالب هارمونیک ها بدست آمده است و همانطور که انتظار می رود در باس ۶۸۰ مشترک آلوده کننده است. همانگونه که از مقادیر داده شده در جدول مشاهده می شود با توجه به روش ارائه شده در [۸] بر اساس اختلاف فاز بین زوایای فاز هارمونیکی ولتاژ وجریان اندازه گیری شده نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از روش دامنه های متناسب سیگنال و همینطور نتیجه بدست آمده از رابطه (۱۱) مطابقت دارد. مقدار HGI این بار نیز در لحظه نمونه برداری برابر 1953. بوده که این نیز خود شاخصی جهت تعیین میزان غیر خطی بودن بار بوده وبا انجام تحقیقات بیشتر بر روی این شاخص حتی نوع منبع آلوده کننده را می توان تعیین نمود. همچنین با توجه به رابطه (۱۱) مقدار z نیز

برابر ۷۲،۵۸۸۹ بوده که بیانگر این است که بار منبع اصلی آلودگی در نقطه اتصال مشترک به شبکه می باشد.



شکل(۳): دیاگرم تک خطی شبکه ۱۳ گره IEEE با بار آلوده کننده

۴- نتایج تست عملی

روش ارائه شده در این مقاله جهت تعیین محل غالب هارمونیک در نقطه اتصال مشترک به شبکه در شبکه برق منطقه ای باختر پیاده سازی شده است. دستگاه اندازه گیری در پست اراک۲ فیدر آذرآب نصب گردید. نتایج حاصل از تست عملی سه فاز در تاریخ (83/9/10) در جدول (۲) آورده شده است. همانطور که از نتایج جدول (۲) مشاهده می گردد آلودگی ایجاد شده در نقطه اندازه گیری از طرف مشترک است که صحت آزمایشات را تأیید می کند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا با استفاده از مفهوم بار های سازگار و ناسازگار روشی به منظور جداسازی مشارکت مصرف کننده و منبع تغذیه از شکل موج معوج مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس شاخص HGI و روش ارائه شده در مقاله رابطه ای به منظور تعیین جهت انتشار آلودگی هارمونیکی در نقطه اتصال مشترک به شبکه پیشنهاد شده است. سپس روش دامنه های متناسب سیگنال ارائه شد. در این مقاله به منظورتعیین جهت منبع آلودگی نمونه برداری همزمان از ولتاژ و جریان در یک نقطه کافی است. با انجام محاسبات می توان جهت جریان یا توان گذرنده از بار به منبع تغذیه یا از منبع تغذیه به بار را تعیین نمود. از ویژگی های مهم روش ارائه شده در مقاله این است که توسط هر دستگاه اندازه گیری کیفیت توان که می تواند ولتاژ و جریان را به طور لحظه ای اندازه گیری کند، قابل اجراست و با به کارگیری آن می توان جهت منبع تولید آلودگی در شبکه را تعیین کرد و بر اساس تعیین جهت آلودگی در شبکه جهت اصلاح آن گام برداشت تا بدینوسیله توزیع انرژی الکتریکی با کیفیت بالا را برای مصرف کنندگان خصوصاً بارهای حساس فراهم کند. قابل ذکر است که با انجام تحقیقات بیشتر و بررسی میزان آلوده کنندگی بارهای آلوده کننده مختلف و با استفاده از شاخص HGI همچنین رابطه پیشنهاد شده در این مقاله می توان علاوه بر تعیین جهت منبع آلودگی، نوع منبع آلوده کننده را نیز تعیین نمود.

۶- مراجع

[1] A.E.Emanual,On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits,IEEE Transactions on Power Delivery,Vol 8,No3,July 1993,PP841-52

[2] IEEE std 519-1992,IEEE Recommended Practice and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems

[3] A.E.Emanuel,J.A.Orr,D.Cyganski and E.M.Gulachenski,A Survey of Harmonic Voltages and Currents at the Customer Bus,IEEE Transactions on Power Delivery,1993

[4]www.arbiter.com/ftp/datasheets/1133a.Direction_H armonic_Flicker_pdf

[5] K.Srinivasan,On Seperating Customer and Supply Side Harmonic Contributions,IEEE Transactions on Power Delivery,Vol 11,No.2,April 1996,PP1003-12

[6] W.Xu,Y.Liu,A Method For Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the point of Common Coupling,IEEE Transactions on Power Delivery,Vol 15,No.2,April2000

[7] N.Locci, C.Muscas, S.Sulis, "Investigation on the accuracy of harmonic pollution metering techniques," IEEE Trans, Instrument and Measurement, vol.53, no.4, pp. 1140-1145, August 2004.

[8] CIGRE36.05/CIRED 2, "Review of methods for measurement and evaluation of the harmonic emission level from an individual distorting load" January 1999.

[9] C.Muscas, "Assessment of electric power quality:Indices for identifying disturbing loads," ETEP, vol. 8, no. 4,pp 287-292, 1998.

جدول(۱): مقادیر بدست آمده نرمالیزه شده ولتاژ وجریان

	fundamental	h3	h5	h7	h9	h11	h13	H15
amplitude	1.00E+00	9.28E-03	4.91E-02	1.16E-02	6.23E-03	5.04E-03	5.04E-04	1.34E-03
phase	-5.2970206	126.4583	-25.3762	41.86419	127.486	28.39915	50.32442	-118.576
amplitude	1.00E+00	1.43E-01	3.60E-01	6.15E-02	4.76E-02	1.05E-01	1.63E-02	4.80E-03
phase	-8.2996959	-123.592	100.0556	176.4083	-53.7993	-157.053	-50.0627	86.53173
amplitude	1.00E+00	9.28E-03	4.91E-02	1.16E-02	6.23E-03	5.04E-03	5.04E-04	1.34E-03
phase	-8.2996959	123.4556	-28.3789	38.86151	124.4811	25.39647	47.32174	-121.579
amplitude	0	0.1469	0.3924	0.0705	5.38E-02	0.11	0.0164	6.00E-03
phase	0	59.7436	-74.3197	2.7853	126.0017	23.0592	128.1879	-99.9434
$\cos(\theta_v-\theta_i)$	0.99862	-0.34119	-0.5797	-0.70145	-1.00E+00	-0.9954	-0.18029	-9.06E-01

جدول (۲): مقادیر دامنه های جریان و ولتاژ بدست آمده از تست عملی

	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9
Va	0	0	0	1.26032	0	0.342866	0	0
Ia	0.5721616	0.474426	1.71213	4.505501	0	0.688157	0.33146	0
Vb	0	0	0	1.334716	0	0	0	0
Ib	0.5940643	0	1.422814	4.268942	0	0.340075	0	0
Vc	0	0	0	1.39314	0	0	0	0
Ic	0.9870632	0.620551	1.474732	3.982095	0	0.587237	0	0

	h10	h11	h13	h15	h17	h19	h21	h23
Va	0	0	0	0	0	0	0	0
Ia	0	0	0.532835	0	0.302273	0	0	0
Vb	0	0	0	0	0	0	0	0
Ib	0	0.348119	0.333113	0	0	0	0	0.415094
Vc	0	0	0	0	0	0	0	0
Ic	0	0.336651	0.356999	0	0	0	0	0.318318