

# بررسی اتصال کوتاه در سیستم‌های AC دارای خطوط انتقال HVDC

مهندس بهروز احمدزاده محبوبی

مربی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر شهرام منتصر کوهساری

استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده

بررسی اتصال کوتاه در سیستم‌هایی که دارای خطوط انتقال HVDC می‌باشند نیاز به مدل کردن دقیق میدلهای موجود در ترمینالهای خط DC دارد تا بتوان رفتار غیرخطی آنها را در لحظات گذرای پس از اتصالی شبیه‌سازی کرد. در این مقاله ضمن معرفی چنین مدلی، با در نظر گرفتن کنترلرهای معمول در ترمینالهای خط DC به بررسی اثر این نوع خطوط بر جریان اتصال کوتاه در سیستم خواهیم پرداخت.

## Fault Studies in AC Systems Interconnected by HVDC Link

B.A. Mahboobi, M.Sc.

Elect. Eng. Dept. Amirkabir Univ. of Tech.

SH. Montasser. k. Ph.D.

Elect. Eng. Dept. Amirkabir Univ. of Tech.

## ABSTRACT:

*The analysis of the fault in the systems containing H.V.D.C. links requires an exact model of the converters, in order to simulate the nonlinear behaviour of these components during the transient condition which will be incurred after the disturbance is initiated in AC system.*

*Such a model for H.V.D.C. links together with its associated controllers suitable for fault analysis is introduced in this paper and the effect of H.V.D.C. transmission line on the short circuit capacity of the AC power system is investigated by employing a newly developed computer program for the simulation of fault in AC-DC systems.*

خواهد شد. پل گرتز سه فاز (۶ پالسه) مطابق شکل ۱ تنها ترکیبی از دریاچه‌هاست که برای میدلهای این خطوط کاربرد عملی یافته است. گرچه برای کاهش هارمونیکهای ایجاد شده در سیستم AC در اکثر طرحهای جدید از میدلهای ۱۲ پالسه استفاده می‌شود، اما باید توجه داشت که این یک ترکیب جدیدی از دریاچه‌ها نیست، بلکه دوپل گرتز سه فاز سری شده است که یکی توسط ترانس ستاره - ستاره و دیگری توسط ترانس ستاره - مثلث تغذیه شده‌اند تا با ایجاد اختلاف فاز ۳۰°،

## ۱- مقدمه

در خطوط انتقال HVDC<sup>۱</sup> تبدیل کمیات AC به DC و بالعکس توسط میدلهای موجود در ترمینالها یعنی یکسوساز و اینورتر انجام می‌شود. این میدلهای با استفاده از دریاچه‌های آفابل کنترلی که عبور جریانشان ذاتاً "یکطرفه است" (نظیر تریستورها) ساخته می‌شوند. البته فقط شروع به هدایت این دریاچه‌ها قابل کنترل بوده و قطع شدن آنها در صورت موفقیت کمونسیون و جایگزینی دریاچه‌ای دیگر حاصل

در تغییر توپولوژی شبکه وارد نمی شوند.

$k$  = تعداد شاخه‌های سلفی متصل به‌مدلها

$\alpha$  = تعداد گره‌هایی که حداقل دارای یک شاخه خازنی و هر تعداد شاخه سلفی و یا مقاومتی باشند.

$\beta$  = تعداد گره‌هایی که حداقل دارای یک شاخه مقاومتی و هر تعداد شاخه سلفی بوده اما اصلاً "شاخه خازنی نداشته باشند".

$\gamma$  = تعداد گره‌هایی که فقط شاخه سلفی به آنها متصل باشد.

$\delta$  = تعداد گره‌هایی که فقط شاخه سلفی نوع  $k$  به آنها متصل باشد. لازم به‌ذکر است که منابع ولتاژ را می‌توان به‌صورت سری با شاخه‌های سلفی نوع  $l$  در نظر گرفت.

با استفاده از تعاریف فوق، ماتریس تلاقی شاخه - گره را می‌توان به‌صورت زیر تفکیک کرد:

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{\alpha c} & K_{\alpha r} & K_{\alpha l} & K_{\alpha k} \\ K_{\beta c} & K_{\beta r} & K_{\beta l} & K_{\beta k} \\ K_{\gamma c} & K_{\gamma r} & K_{\gamma l} & K_{\gamma k} \\ K_{\delta c} & K_{\delta r} & K_{\delta l} & K_{\delta k} \end{bmatrix} \quad (1)$$

عناصر هریک از زیرماتریسها در حالت کلی چنین تعیین می‌شوند:

$$K_{p_i} = \begin{cases} 1 & \text{اگر گره } p \text{ ابتدای شاخه } i \text{ باشد;} \\ -1 & \text{اگر گره } p \text{ انتهای شاخه } i \text{ باشد;} \\ 0 & \text{اگر گره } p \text{ ارتباطی با شاخه } i \text{ نداشته باشد;} \end{cases} \quad (2)$$

بدیهی است که طبق تعاریف فوق همواره زیرماتریسهای زیر قطر اصلی ماتریس فوق صفر هستند. همچنین با توجه به این که در عمل راکتور صاف‌کننده جریان DC به‌خط‌هوایی یا کابل و نیز ترانس مبدل به‌فیلترهای هارمونیک یا خط‌هوایی یا کابل یا خازن متصل می‌شوند لذا شاخه‌های نوع  $k$  هیچگاه با گره‌های نوع  $\gamma$  تلاقی نداشته و زیرماتریس  $K_{\gamma k}$  هم صفر خواهد بود.

### ۳- روابط ولتاژ و جریان

با استفاده از آنالیز گره و با توجه به عدم وجود منبع جریان در شبکه‌های مورد بررسی، معادله کلی گره‌ها چنین خواهد شد:

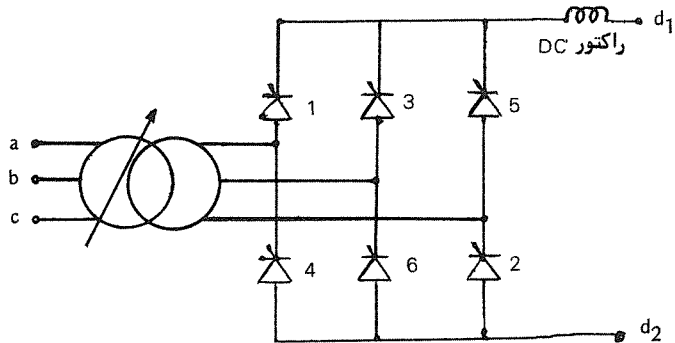
$$[K] \cdot [I] = [0] \quad (3)$$

با تفکیک ماتریس تلاقی و توجه به صفر بودن بعضی از زیرماتریسهای آن، معادله انواع گره‌ها بدست می‌آید سپس با مشتق‌گیری در روابط KCL مربوط به گره‌های نوع  $\gamma$  و فرض ثابت بودن اندوکتانسها و نیز نوشتن معادلات هریک از انواع شاخه‌ها برحسب بردار جریان آن شاخه و ولتاژ انواع گره‌ها می‌توان به معادلات سیستم رسید (۲):

$$\frac{dI_k}{dt} = L_k^{-1} (-R_k I_k + K_{\alpha k}^t V_{\alpha} + K_{\beta k}^t V_{\beta} + K_{\gamma k}^t V_{\gamma} + K_{\delta k}^t V_{\delta}) \quad (4)$$

$$\frac{dI_l}{dt} = L_l^{-1} (E_l - R_l I_l + K_{\alpha l}^t V_{\alpha} + K_{\beta l}^t V_{\beta} + K_{\gamma l}^t V_{\gamma}) \quad (5)$$

$$I_r = R_r^{-1} (K_{\alpha r}^t V_{\alpha} + K_{\beta r}^t V_{\beta}) \quad (6)$$



شکل ۱- پل گرتز سه‌فاز با شماره‌گذاری دریاچه‌ها به ترتیب روشن شدن

هارمونیکهای پنجم و هفتم را حذف کنند (۳) و روشن شدن دریاچه‌های این دو پل با ترتیبی مشابه و به‌طور همزمان انجام می‌شود. به همین دلیل در این مقاله مدل‌های ۶ پالس ستاره - ستاره مورد توجه قرار خواهند گرفت.

از آنجا که در پی بروز اتصال کوتاه و یا کلا "هرگونه اغتشاشی در سیستم که منجر به تغییر و عدم تعادل ولتاژ شینهای AC مبدلها شود، عملکرد دریاچه‌ها از حالت عادی و تغییرات منظم خود خارج می‌شود لذا برای مطالعه رفتار مبدل و سیستم دیگر نمی‌توان از مدل حالت مانا و معادلات جبری (آنطور که در بررسی اتصال کوتاه سیستمهای AC مطرح است) استفاده کرد. در گذشته عموماً "مطالعه اتصال کوتاه در سیستمهای AC-DC توسط شبیه‌سازهای آنالوگ انجام می‌شد، اما امروزه به دلیل گستردگی کاربرد کامپیوترهای دیجیتال در بررسی سیستمهای قدرت استفاده از شبیه‌سازهای دیجیتالی متداول می‌باشد.

برای کاهش حجم حافظه لازم و افزایش سرعت اجرای چنین برنامه‌هایی می‌توان شبکه مورد بررسی را تا حد معقولی خلاصه کرده و آنگاه اجزای تشکیل‌دهنده شبکه، شامل مقاومت، اندوکتانس، خازن، منابع ولتاژ و سوئیچهای مبدلها را با توجه به ماتریس تلاقی شاخه - گره در نظر گرفت. سپس معادلات سیستم را به دست آورده و با آنالیز گره یا آنالیز حلقه، جریانها و ولتاژها را به‌صورت لحظه به لحظه محاسبه کرد. اما یکی از مشکلاتی که چنین برنامه‌های خواهد داشت تغییر مکرر توپولوژی مدار ناشی از تغییر حالت دریاچه‌های مبدلها است. زیرا با روشن و یا خاموش شدن هر دریاچه، اتصال شاخه‌های دو طرف مبدل به هم تغییر کرده و معادلات این بخش از سیستم تغییر می‌کند. لذا در این مقاله گره‌ها و شاخه‌های شبکه بنحوی طبقه‌بندی و تفکیک شده‌اند که فقط بخشی از سیستم که با مبدلها مرتبط است در تغییر توپولوژی مدار مطرح شود و زمان کمتری برای اصلاح معادلات سیستم در زمان تغییر حالت دریاچه‌ها لازم باشد.

### ۲- تعاریف

شاخه‌ها و گره‌های شبکه را می‌توان به‌صورت زیر تقسیم‌بندی

کرد: (۱)

$c$  = تعداد شاخه‌های خازنی

$r$  = تعداد شاخه‌های مقاومتی

$l$  = تعداد آندسته از شاخه‌های سلفی که به مبدلها اتصال نداشته و

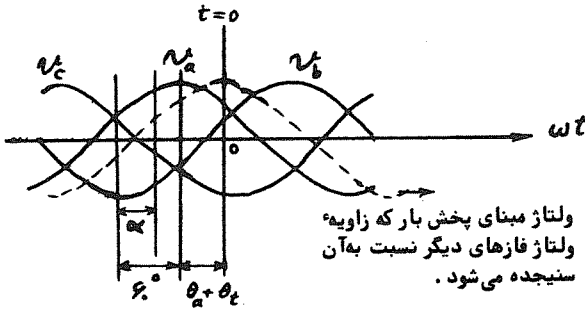
زودتر از مبداء زمان رخ داده است و طبق شکل ۲ این مقدار عبارت است از:

$$A = 60^\circ + \theta_a + \theta_t \quad (15)$$

بنابراین درجه ۱ نسبت به لحظه صفر به اندازه B درجه زودتر شروع به هدایت می کند:

$$B = A - \alpha \quad (16)$$

در این شرایط درجه های ۱ و ۶ هادی بوده و پس از گذشت زمانی متناسب با  $B - 60^\circ$  از  $t = 0$  درجه ۲ با درجه ۶ شروع به کموتاسیون خواهد کرد. البته باید توجه شود که اگر B عددی منفی به دست آید، بدین معنی است که درجه ۱ هنوز آتش نشده و همچنین اگر در فاصله  $60^\circ < B < 120^\circ$  باشد بیانگر این است که هدایت درجه ۱ و ۶ به پایان رسیده و در  $t = 0$  درجه های ۱ و ۲ هادی هستند. به هر حال می توان با محاسبه B و معلوم بودن ترتیب صحیح آتش شدن درجه ها، شرایط اولیه هر مبدل را تعیین کرد. البته واضح است که به دلیل صرف نظر کردن از زاویه کموتاسیون در رابطة اخیر، شرایط اولیه مبدلها با قدری تقریب به دست خواهند آمد، اما این مسئله با توجه به این که کل شرایط اولیه ای هم که از محاسبه پخش بار به دست می آیند دارای قدری تقریب هستند، قابل توجیه است. در هر حال برنامه نوشته شده قبل از اعمال اتصالی با چند تکرار شبکه را به حالت تعادل می رساند.



شکل ۲- تعیین شرایط اولیه در هر مبدل

#### ع- کنترل مبدلها

یکی از مزایای انتقال HVDC قابلیت کنترل سریع آن بر میزان جهت توان انتقالی می باشد که با کنترل زاویه آتش درجه های مبدلها انجام می شود. کنترل هر مبدل می تواند براساس دوروش زیر انجام شود (۱):

(۱) کنترل مستقل فازها<sup>۱</sup> و (۲) کنترل آتش درجه ها با فاصله یکسان<sup>۸</sup>.

به دلیل مزایای روش دوم، امروزه تقریباً در تمامی طرحهای HVDC کنترل و ارسال پالس آتش به درجه ها براساس این روش انجام شده و کمیت مورد کنترل در یکسوساز و اینورتر به ترتیب جریان خط DC و زاویه خاموشی درجه ها می باشد به این ترتیب با استفاده از یک حلقه فیدبک منفی و یک کنترلر تناسبی (P) یا تناسبی و مشتق گیر (P.D.) یکسوساز تحت کنترل جریان ثابت<sup>۹</sup> و اینورتر تحت کنترل زاویه خاموشی ثابت<sup>۱۰</sup> قرار می گیرد (۳) و (۴).

زمان آتش هر درجه با توجه به زمان آتش درجه قبلی از همان

$$\frac{dV_\alpha}{dt} = -C_\alpha^{-1} (K_{\alpha\ell} I_\ell + K_{\alpha k} I_k + K_{\alpha r} I_r) \quad (7)$$

$$V_\beta = -R_\beta (K_{\beta r} R_r^{-1} K_{\alpha r}^t V_\alpha + K_{\beta\ell} I_\ell + K_{\beta k} I_k) \quad (8)$$

$$V_\gamma = -L_\gamma K_{\gamma\ell} L_\ell^{-1} (E_\ell - R_\ell I_\ell + K_{\alpha\ell}^t V_\alpha + K_{\beta\ell}^t V_\beta) \quad (9)$$

$$V_\delta = -L_\delta K_{\delta k} L_k^{-1} (-R_k I_k + K_{\alpha k}^t V_\alpha + K_{\beta k}^t V_\beta) \quad (10)$$

که در آنها:

$$C_\alpha = K_{\alpha c} C_c K_{\alpha c}^t \quad (11)$$

$$R_\beta = (K_{\beta r} R_r^{-1} K_{\beta r}^t)^{-1} \quad (12)$$

$$L_\gamma = (K_{\gamma\ell} L_\ell^{-1} K_{\gamma\ell}^t)^{-1} \quad (13)$$

$$L_\delta = (K_{\delta k} L_k^{-1} K_{\delta k}^t)^{-1} \quad (14)$$

و نیز:

$R_k$  و  $L_k$  به ترتیب مقاومت و اندوکتانس شاخه های نوع K

$R_\ell$  و  $L_\ell$  به ترتیب مقاومت و اندوکتانس شاخه های نوع  $\ell$

$R_r$  مقاومت شاخه های نوع r

$C_c$  ظرفیت خازنی شاخه های نوع c می باشند.

#### ۴- مدل حالت گذرای مبدلها:

انواع حالت های هدایت هر پل مبدل اعم از شرایط عادی یا شرایط کموتاسیون را می توان با تعریف ۳ گره نوع  $\delta$  به نامهای  $\delta_t$ ،  $\delta_m$  و  $\delta_b$  برای آن پل نشان داد. (۲) با در نظر گرفتن شکل ۱ هرگاه درجه بالایی هر یک از فازها روشن باشد، آنگاه آن فاز به  $\delta_t$  و هرگاه درجه پایینی هر یک از فازها روشن باشد آن فاز به  $\delta_b$  مگره وصل می شود و چنانچه هیچیک از درجه های بالایی و پایینی در یک فاز روشن نباشد، آن فاز به  $\delta_m$  وصل می شود. ترمینال DC پل یعنی  $d_1$  و  $d_2$  هم همواره به ترتیب به  $\delta_b$  و  $\delta_t$  متصل هستند به این ترتیب زیرماتریس  $K_{\delta k}$  با توجه به وضعیت درجه های پل می تواند به دست آید. هرگاه حالت درجه های پل عوض شود، زیرماتریس تلافی  $K_{\delta k}$  و در نتیجه ماتریس  $L_\delta$  تغییر خواهند کرد. پس باید در ابتدای برنامه با تشخیص شرایط اولیه هر مبدل ماتریسهای فوق را برای لحظه صفر بدست آورده و سپس با هر تغییر حالت درجه ها، آنها را اصلاح کرد (۱).

#### ۵- شرایط اولیه مبدلها

تعیین شرایط اولیه هر مبدل به معنی تشخیص حالت درجه هایش در لحظه صفر و نیز محاسبه زمان شروع اولین کموتاسیون پس از آن می باشد. درجه های هادی هر مبدل با توجه به زاویه ولتاژ فاز ( $\theta_a$ ) که در مقایسه با ولتاژ مرجع با مطالعه پخش بار (۵) به دست می آید و نیز زاویه تاخیر آتش مبدل ( $\alpha$ ) و شیفت فازی ترانس مبدل ( $30^\circ$  یا  $0^\circ$ ) تعیین می شوند. اگر ولتاژ مرجع را به صورت تابع کسینوسی فرض کنیم، لحظه تلافی مثبت ولتاژ فازهای c و a (یعنی لحظه ای که ولتاژ مستقیم روی درجه ۱ مثبت شود) به اندازه A درجه

مبدل (طبق شماره‌گذاری شکل ۱) از رابطه زیر تعیین می‌شود (البته زمان آتش‌اولین دریاچه پس از  $t=0$  از محاسبات شرایط اولیه مبدل به دست می‌آید):

$$F_i = F_{i-1} + 60^0 + \Delta P_i \quad (17)$$

که در آن  $F_i$  و  $F_{i-1}$  زمان آتش‌دریاچه‌های  $i$  ام و  $(i-1)$  ام و  $\Delta P_i$  مقداری است که ناشی از عملکرد تصحیح‌کنندگی سیستم کنترلر مبدل است و در شرایط مانا برابر صفر می‌باشد. در صورت بروز هرگونه اغتشاشی که منجر به تغییر کمیت مورد کنترل در هر یک از مبدلها شود، سیستم کنترل آن مبدل فعال شده و زمان آتش‌دریاچه‌هایش را به اندازه  $\Delta P_i$  اصلاح می‌کند. این مقدار برای یکسوساز تحت کنترل جریان ثابت (با کنترلر نوع P.D) عبارت است از:

$$\Delta P_i = K_1 (I_d - I_{d\text{setting}}) + K_2 \frac{dI_d}{dt} \quad (18)$$

و نیز برای اینورتر تحت کنترل زاویه خاموشی ثابت (با کنترلر تناسبی) عبارت است از:

$$\Delta P_i = K_3 (\gamma_i - \gamma_{\text{setting}}) \quad (19)$$

که ضرایب  $K_1$  و  $K_2$  و  $K_3$  ثابتهای قابل تنظیم کنترلرها هستند (۱)

#### ۷- بررسی کامپیوتری

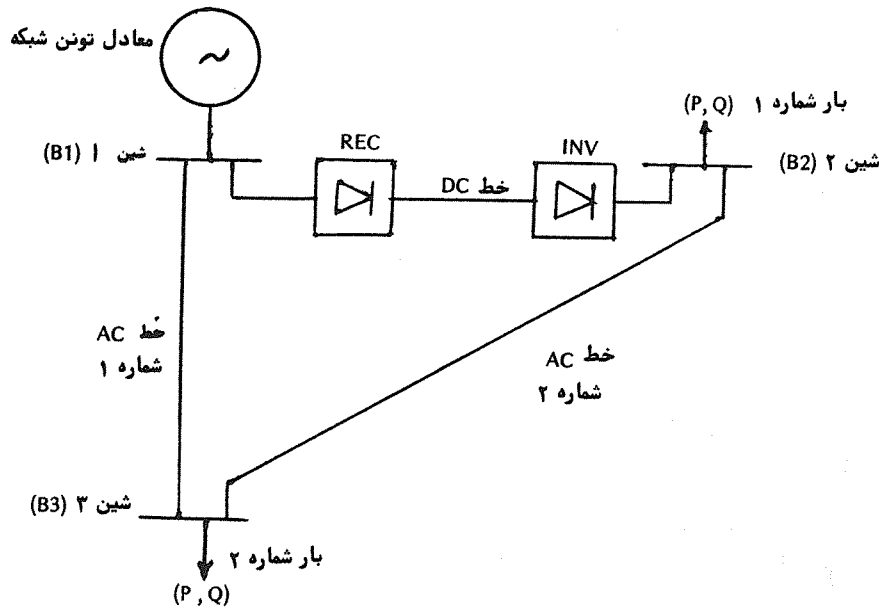
با توجه به توضیحات و روابط ارائه شده، یک برنامه کامپیوتری برای محاسبات اتصال کوتاه سیستمهای AC-DC نوشته شده این برنامه با حل معادلات سیستم، مقادیر ولتاژ گره‌ها و جریان شاخه‌ها را به صورت لحظه به لحظه محاسبه می‌نماید. برای حل معادلات دیفرانسیل از روشهای تحلیل عددی (در اینجا روش رانگ-کاتا درجه چهار) استفاده شده است. محاسبات به صورت منفصل و در لحظات مشخصی که به اندازه طول گام انتگرالگیری با هم فاصله دارند انجام خواهد شد. بنابراین امکان انطباق زمان محاسبه شده برای آتش‌شدن دریاچه‌ها و همچنین زمان خاموش شدن آنها (که از روی منفی شدن جریانشان

قابل تشخیص است) بر این لحظات زیاد نخواهد بود. در این موارد می‌توان با استفاده از میانبندی خطی، طول گام را طوری تغییر داد که دقیقاً "به لحظه مورد نظر دسترسی بیابیم". اعمال اتصالی در این برنامه به این صورت انجام می‌شود که در ابتدا یک مقاومت با مقدار خیلی زیاد در محل مورد نظر، قرار داده می‌شود به طوری که جریان عبوری از آن قابل اغماض باشد و بتوان آن را با مدار باز تقریب زد، سپس در حین اجرای برنامه هرگاه لحظه مورد نظر برای انجام اتصال کوتاه فرا رسید آن را به مقدار مورد نظر کاهش می‌دهیم (۱). در این مقاله برای انجام بررسیها و مقایسه نتایج از شبکه ساده‌شده‌ای که دیاگرام تک خطی آن در شکل ۳ نشان داده شده استفاده گردیده است (۱).

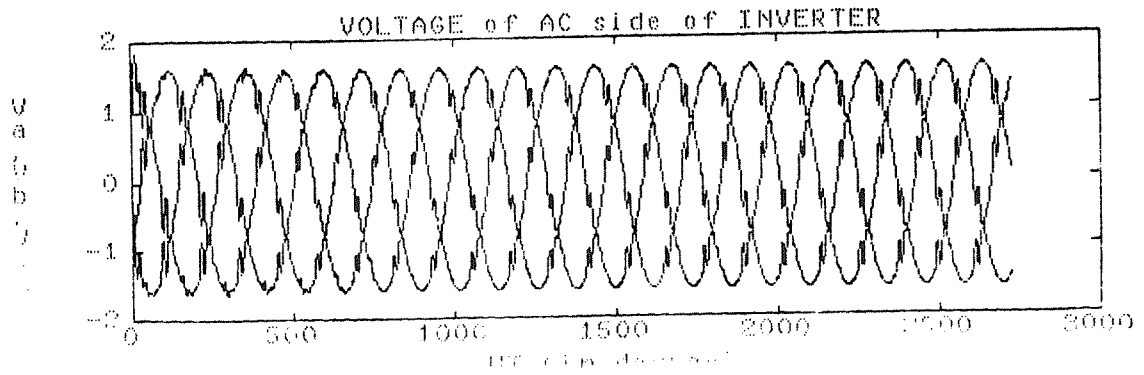
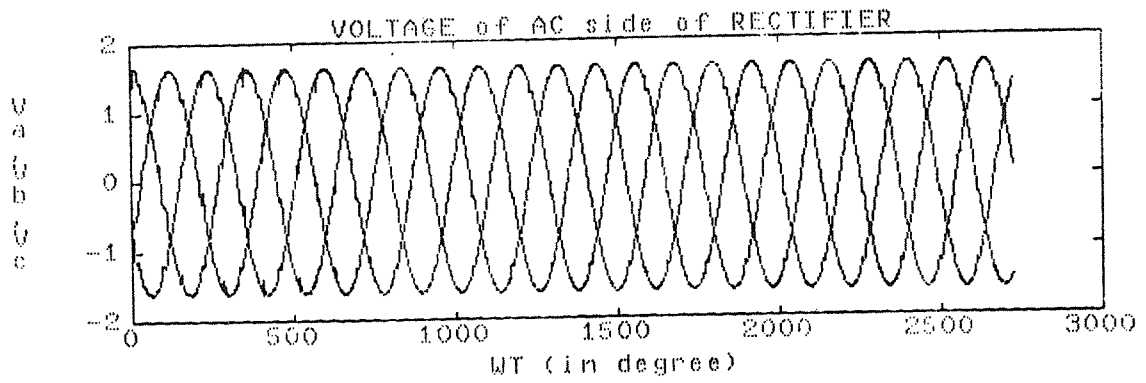
در مدار گسترده این شبکه، خطوط با مدل  $\pi$ ، ترانسفورماتورها با امپدانس اتصال کوتاه‌شان و بارها به صورت استاتیکی (R و L موازی) و نیز مدار معادل بقیه شبکه از شین B1 به صورت معادل تونن نشان داده شده‌اند.

#### ۷-۱- بررسی اثر کنترلرهای خط DC به هنگام تغییر شرایط

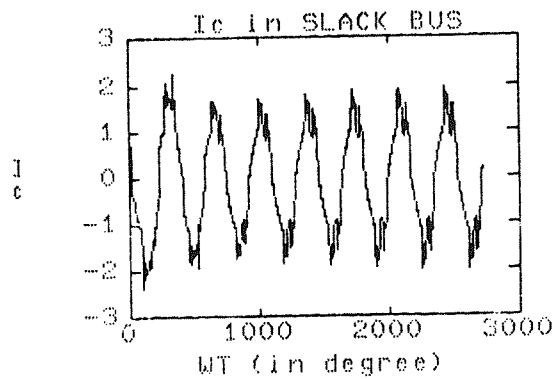
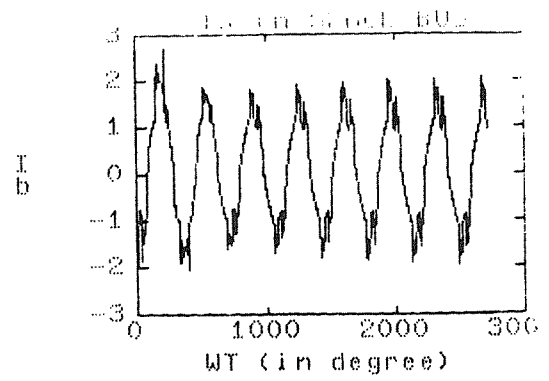
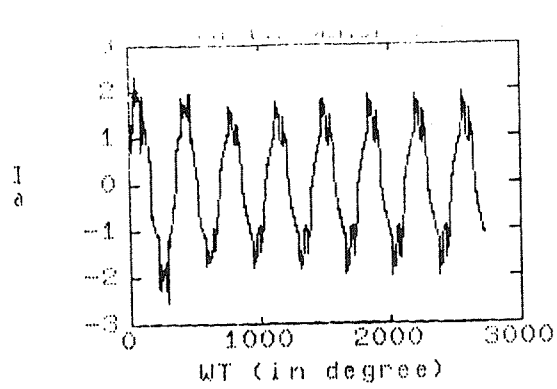
این تست به دو منظور انجام شده است، اولاً "برای این که شکل موج ولتاژ AC و DC مبدلها و نیز جریان منبع و خط DC را در حالت عادی کار داشته باشیم تا پس از وقوع اتصالی بتوان به میزان و نحوه تغییر این کمیات که از مهمترین پارامترهای سیستم هستند پی برد و ثانياً "نحوه عملکرد کنترلر C.C. در یکسوساز و C.E.A. در اینورتر به هنگام تغییر شرایط بهره‌برداری از خط DC را می‌توان نشان داد در شرایط اولیه مورد استفاده در این تست جریان تنظیمی خط DC ( $I_{d0}$ ) برابر  $0.9 \text{ p.u.}$  بوده که پس از تغییر شرایط به  $0.6 \text{ p.u.}$  کاهش یافته است. طول هر گام انتگرالگیری برابر با  $1/10$  میلی ثانیه انتخاب شده که در فرکانس  $50$  هرتز معادل  $1/8$  است. نتایج این تست در شکل ۴ نشان داده شده است. هارمونیک‌هایی که در تمامی شکل موجها دیده



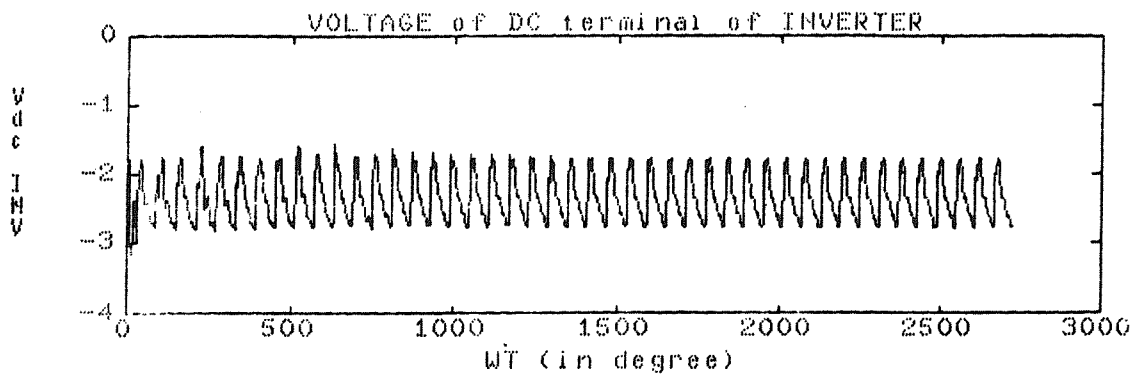
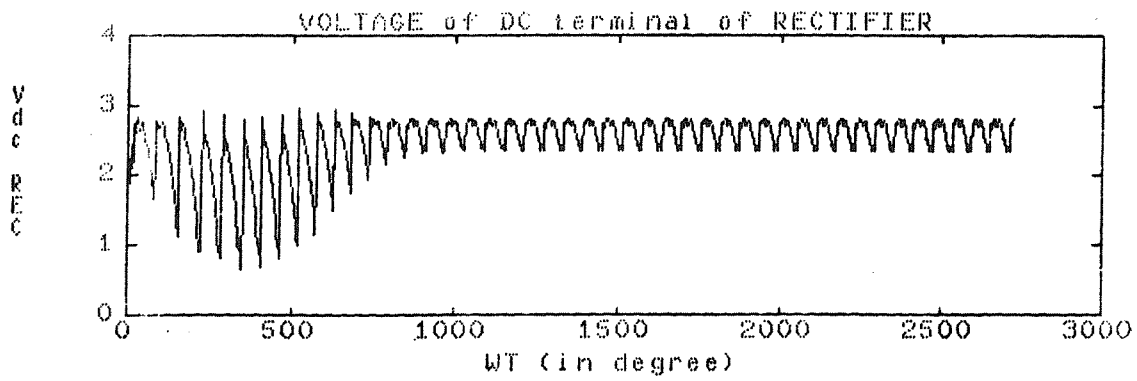
شکل ۳- نمودار تک خطی شبکه مورد بررسی



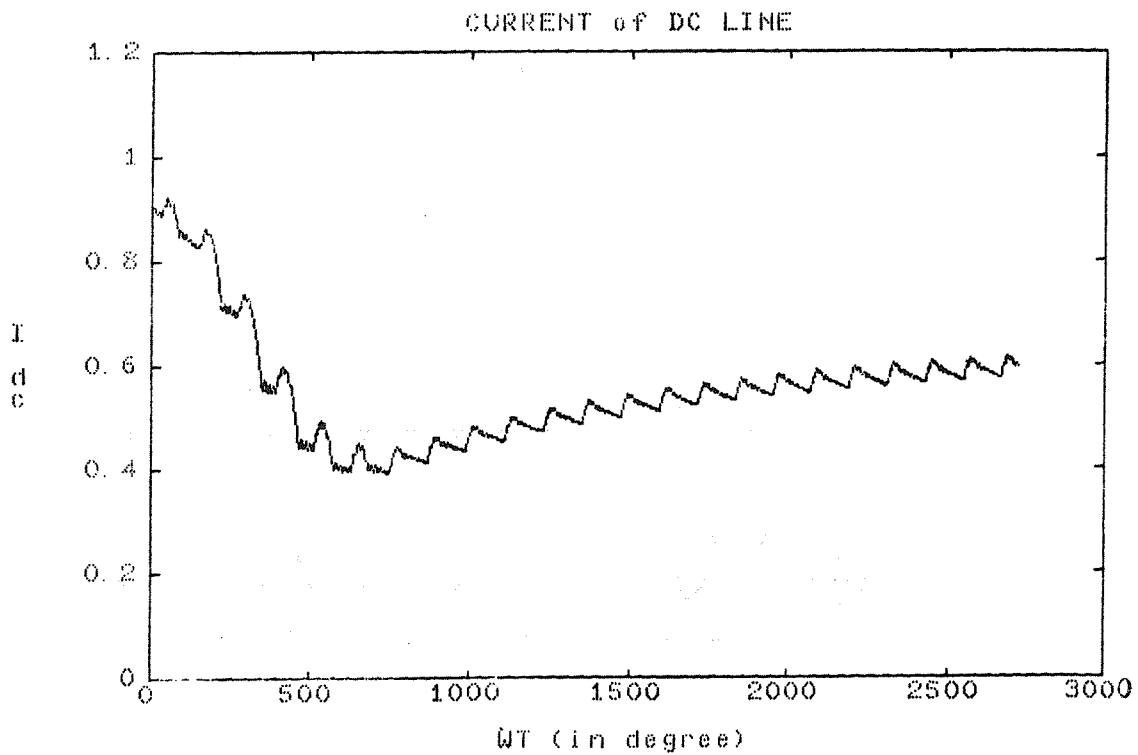
شکل ۴-الف: ولتاژ شینه‌های B1 و B2 پس از کاهش جریان تنظیمی خط DC ( $I_{ds}$ )



شکل ۴-ب: جریان منبع پس از کاهش ( $I_{ds}$ )



شکل ۴-ج: ولتاژ ترمینال DC مبدلها پس از کاهش  $I_{ds}$



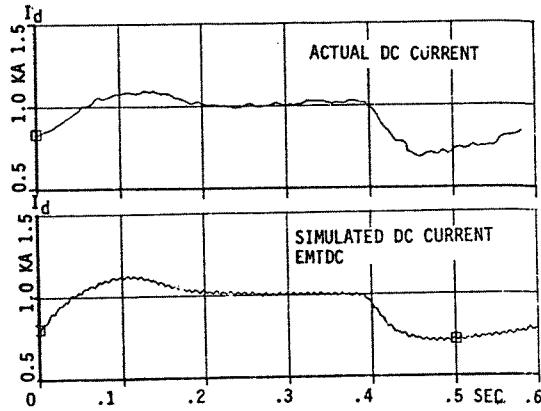
شکل ۴-د: جریان خط DC پس از کاهش  $I_{ds}$

می شود ناشی از عملکرد میدلهای خط DC می باشد که برای کاهش آنها باید از فیلترهای مناسب هارمونیک استفاده شود.

در شکل ۵ نیز تغییرات جریان یک خط DC در یک سیستم خاص در دو حالت واقعی و شبیه سازی شده با فرم افزار EMTDC در پاسخ به یک تغییر پله ای از  $0/8KA$  به  $1KA$  و سپس برگرداندن آن به مقدار اولیه پس از  $0/4 sec$  دیده می شود (۶). این منحنی ها در مقایسه با منحنی شکل ۴-۶ گرچه برای دو سیستم متفاوت و شرایط مختلف هستند، لیکن فرم و ثابت زمانی تقریباً "مشابهی" را که بیانگر پاسخ خطوط DC با کنترلر جریان ثابت به تغییر پله ای جریان هستند، نشان می دهد. البته میزان هارمونیکها در شکل ۵ به مراتب کمتر از نتیجه تست شده در این مقاله است و این صرفاً "به دلیل استفاده از فیلترهای هارمونیک در آن سیستم می باشد".

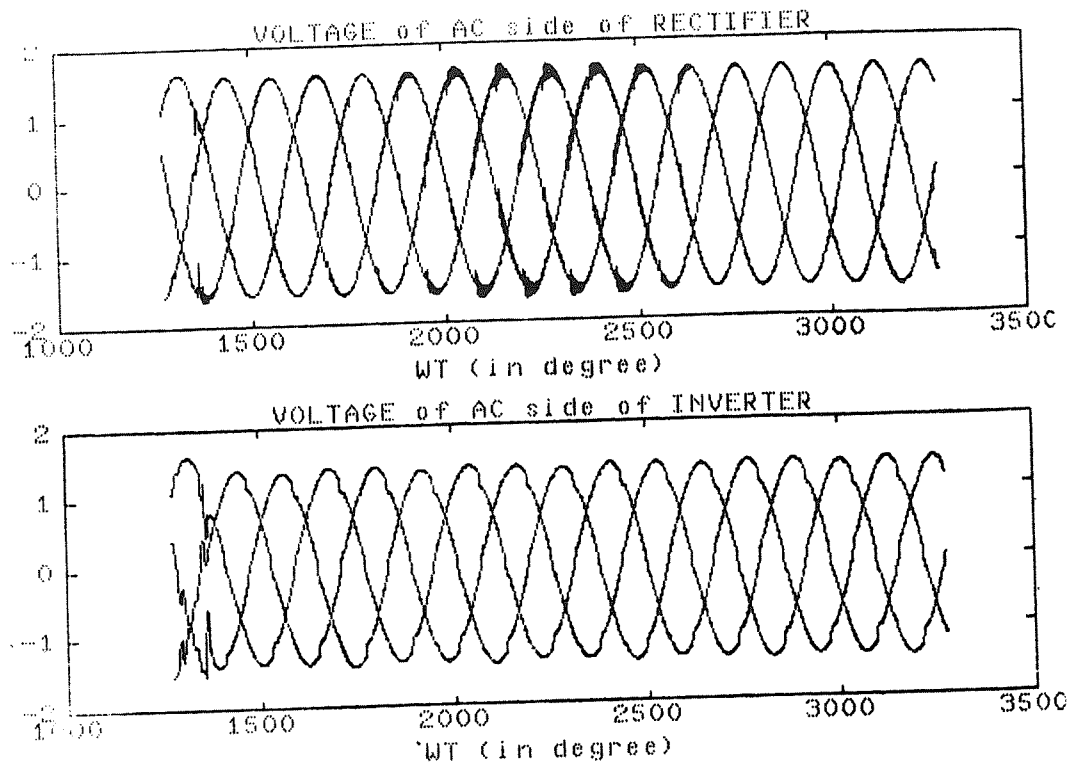
## ۲-۷ بررسی اتصال کوتاه سه فاز در شین B2

برای انجام این تست از نتایج آخرین تکرار تست قبل به عنوان شرایط اولیه استفاده کرده و پس از طی پریودی در حدود چهار سیکل، که سیستم کاملاً "به شرایط مانا رسیده اتصال کوتاه سه فاز با مقاومت  $0/3 pu$  در شین B2 (شین AC اینورتر) اعمال شده و نیز گام انتگرال گیری را کوچکتر کرد تا از ناپایداری عددی در حل معادلات دیفرانسیل (ناشی از خطای روند کردن کامپیوتر و خطای الگوریتم انتگرال گیری) بپرهیز شود و واضح است که این امر منجر به طولانی تر شدن زمان اجرای برنامه خواهد شد (۱). شکل ۶ نحوه تغییرات کمیات

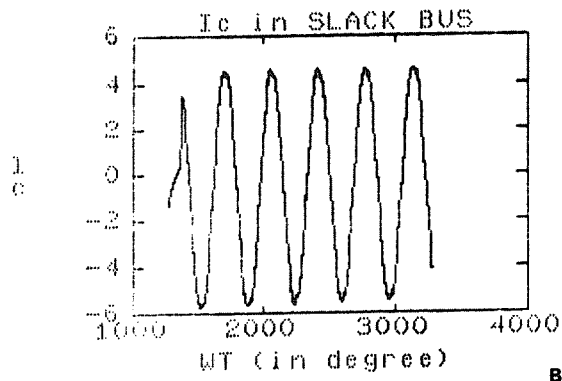
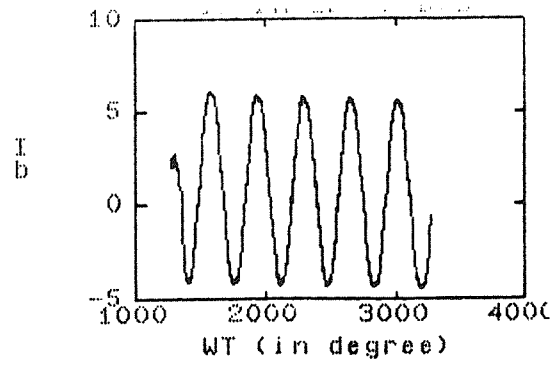
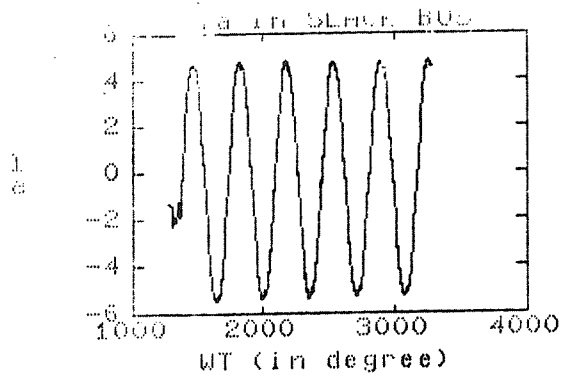


شکل ۵- پاسخ یک سیستم خاص به تغییر پله ای  $0/2KA$  در جریان تنظیمی

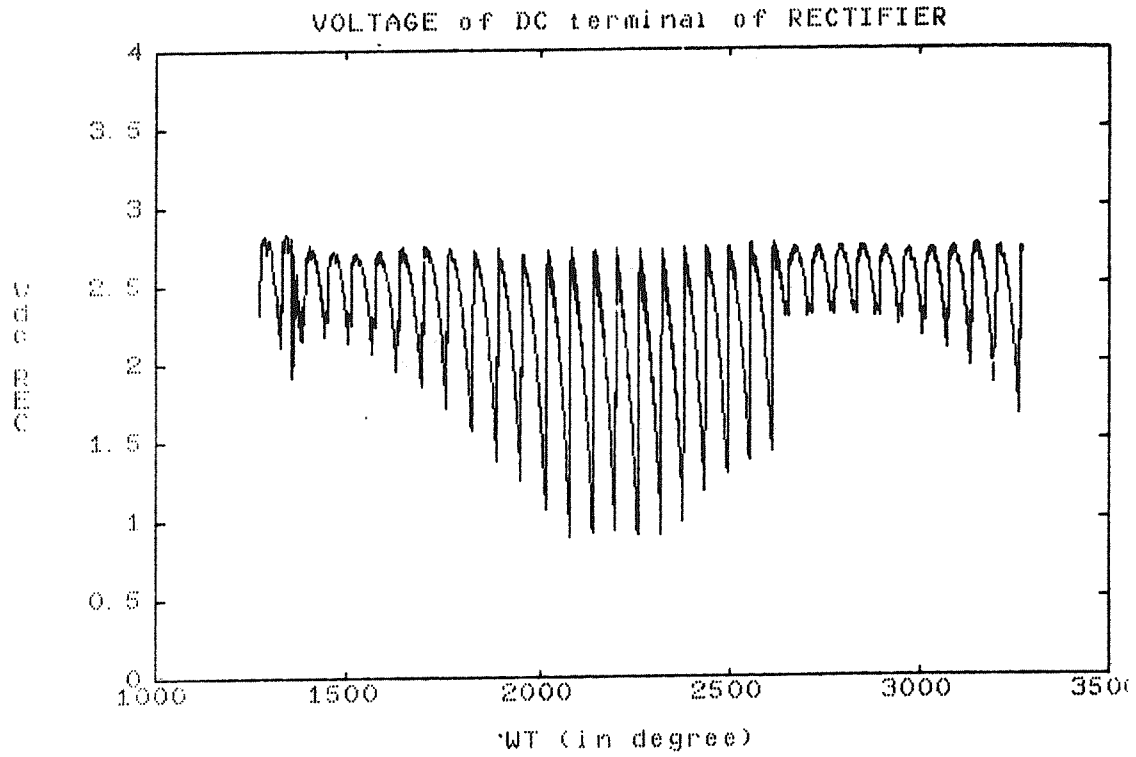
مورد توجه را پس از اعمال اتصالی نشان می دهد. دیده می شود که میزان هارمونیکها پس از اتصالی به مقدار قابل ملاحظه ای تغییر کرده و خصوصاً "در ولتاژ شین اتصالی شده یا جریان منبع شدیداً" کاهش یافته اند که البته دلیل آن افزایش زیاد جریان خطوط AC در مقابل عدم افزایش جریان خط DC و نتیجتاً "کاهش نسبی هارمونیکها نسبت به مولفه هارمونیک اصلی می باشد".



شکل ۶- الف: ولتاژ شینهای B1 و B2 پس از اتصال کوتاه سه فاز در شین B2



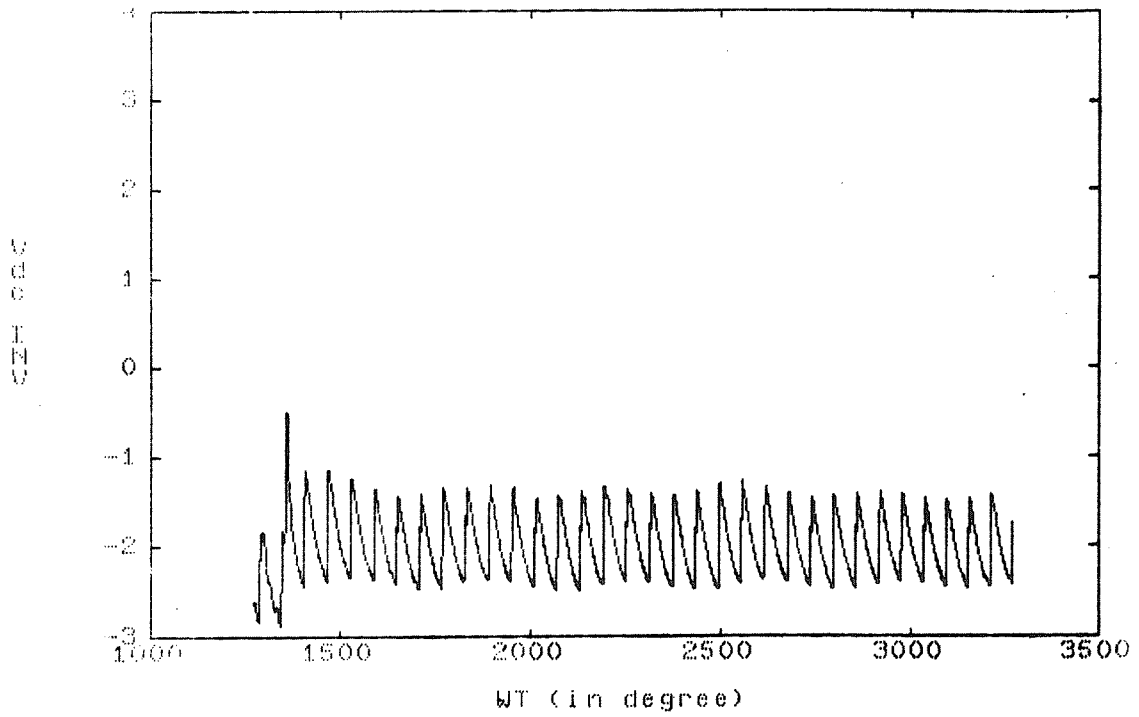
شکل ۶-ب: جریان سه فاز منبع پس از اتصال کوتاه سه فاز در شین B2



شکل ۶-ج: ولتاژ ترمینال DC یکسوساز پس از اتصال کوتاه سه فاز در شین B2

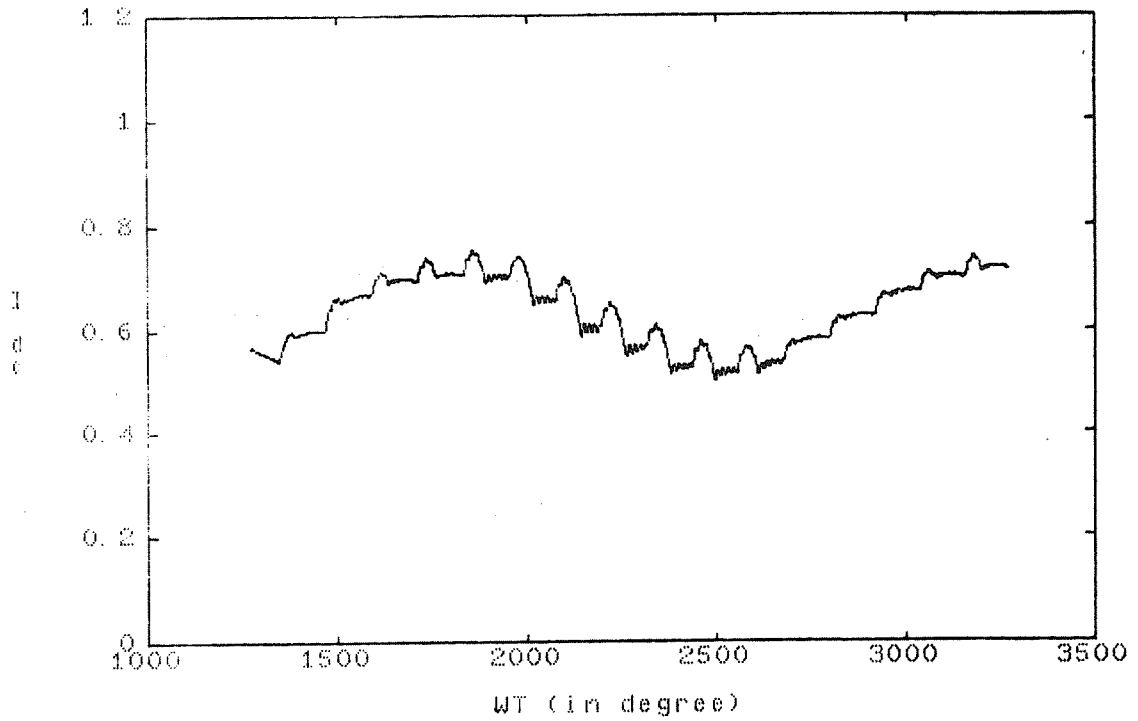


VOLTAGE of DC terminal of INVERTER



شکل ع-د: ولتاژ ترمینال DC اینورتر پس از اتصال کوتاه سه فاز در شین B2

CURRENT of DC LINE



شکل ع-ه: جریان خط DC پس از اتصال کوتاه سه فاز در شین B2

۷-۳ - بررسی اتصال کوتاه سه فاز در شین B2 در صورتیکه خط DC در مدار نباشد

در این تست همهء شرایط، مشابه تست قبل بوده و تنها تفاوت این است که خط DC باز گذاشته شده است، به همین دلیل هارمونیکی در شکل موجها وجود نخواهد داشت. منظور از انجام این تست ارزیابی اثر خط DC بر جریانها ولتاژهای سیستم پس از وقوع اتصالی است که از مقایسهء نتایج این تست (نشان داده شده در شکل ۷) با تست قبل به دست می آید. با مقایسهء شکل موجهای مربوطه می توان دریافت که خط انتقال DC با کنترلر جریان ثابت، سطح اتصال کوتاه شبکه را افزایش چندانی نداده است. لازم به تذکر است که این نتیجه در اکثر کتب و مقالات مربوط به انتقال DC عنوان شده و در این مقاله نیز با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری تأیید شده است.

۸- نتیجه گیری

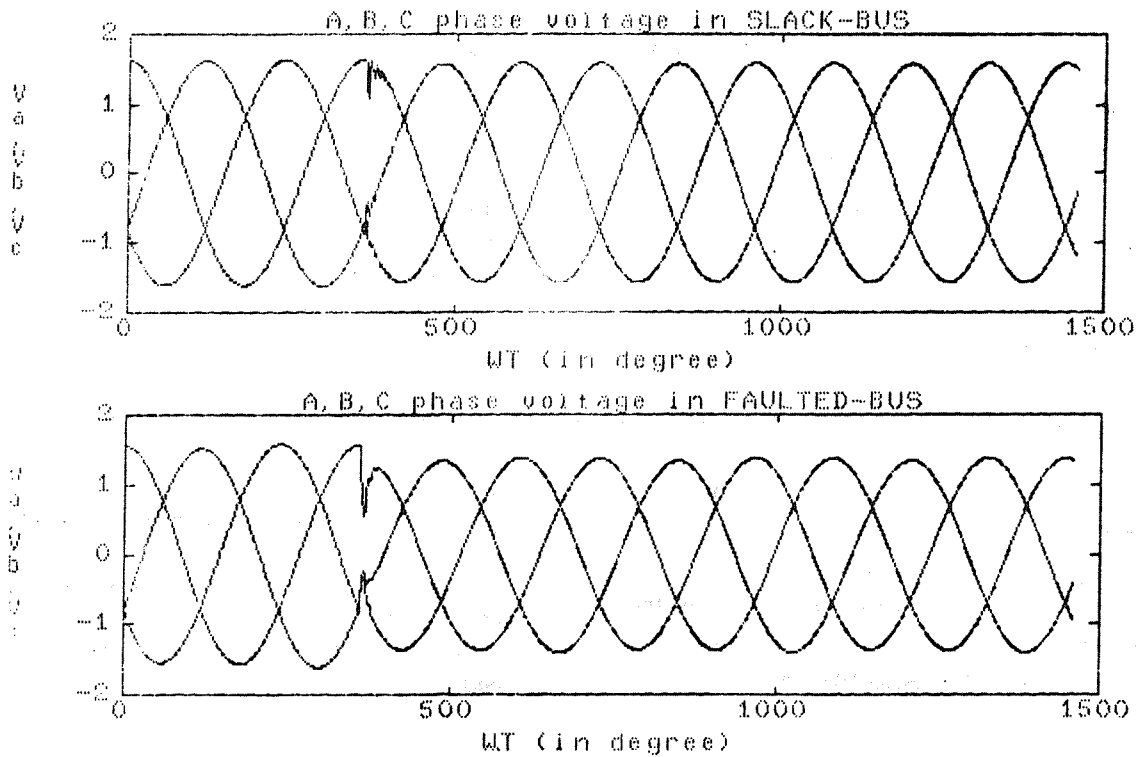
با توجه به مطالب ذکر شده و نتایج بررسیهای انجام شده، نکات زیر قابل نتیجه گیری می باشند:

- ۱- بررسی رفتار سیستمهای AC-DC پس از بروز اغتشاشات مهم همچون اتصال کوتاه می تواند با شبیه سازی دقیق میدلها و کنترلرهای خط DC و حل معادلات دیفرانسیل کلی سیستم به صورت یویا و لحظه به لحظه انجام شود.

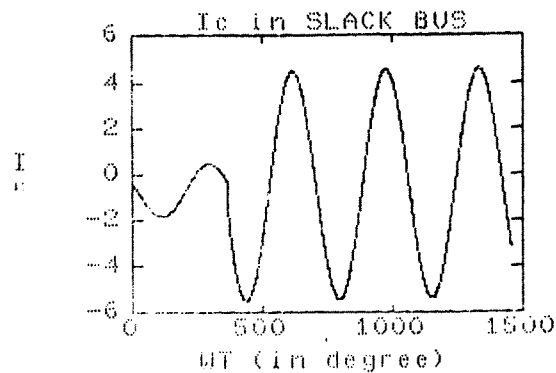
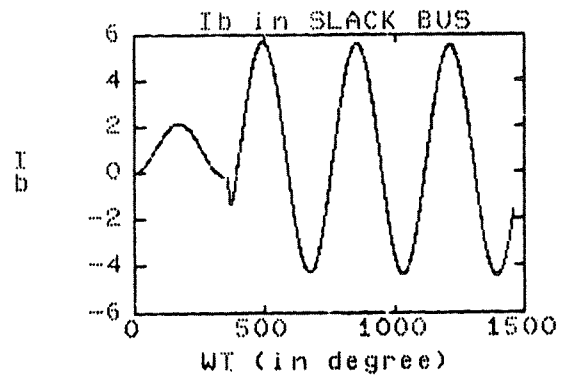
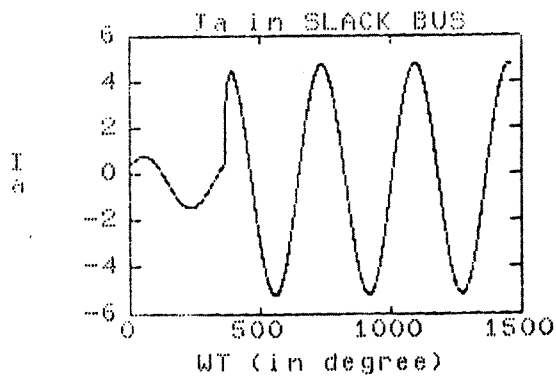
۲- برای بررسی به روش فوق باید معادلات دیفرانسیل مربوط به جریان شاخه های سلفی و ولتاژ گره های خازنی را با یکی از روشهای تحلیل عددی حل کرد و از آنجا که در این سیستمها فواصل زمانی بسیار کوچکی نظیر پریرود کموناسیون مطرح است، لذا باید طول گام انتگرالگیری در حدود  $10^\circ$  یعنی کمتر از  $1/10$  میلی ثانیه انتخاب شود. همچنین روش انتگرالگیری و نیز کامپیوتر محاسب باید دارای حداقل خطا باشند تا احتمال بروز ناپایداری عددی در حل معادلات دیفرانسیل سیستم به حداقل برسد. در این مورد کامپیوتر ۳۲ بیتی بر انواع ۱۶ بیتی مورد استفاده ارجحیت بسیار دارد.

۳- جریان شاخه های مختلف سیستم AC-DC پس از بروز اتصال کوتاه، به دلیل وجود کنترلر جریان ثابت و نیز تغییر توپولوژی سریع میدلهای خط DC نسبت به حالتی که خط DC در مدار نباشد، تفاوت چندانی ندارد و به عبارت دیگر احداث خط DC در سیستمهای قدرت سطح اتصال کوتاه را افزایش نمی دهد.

۴- عملکرد میدلهای خط DC همواره هارمونیکهای را در هر دو طرف AC و DC ایجاد می کند که فرکانس و دامنه شان در شرایط متفاوت متفاوتی را دارند.



شکل ۷-الف: ولتاژ شینه های B1 و B2 پس از اتصال کوتاه سه فاز در شین B2 در حالت قطع خط DC



شکل ۷-ب: جریان منبع پس از اتصال کوتاه سه فاز در شین B2 در حالت قطع خط DC

پاورقی:

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. HVDC = High Voltage Direct Current</li> <li>2. Converter</li> <li>3. Inverter</li> <li>4. Valve</li> <li>5. Node-Branch Incidence Matrix</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>6. Topology</li> <li>7. Individual Phase Control</li> <li>8. Equidistant Firing Control</li> <li>9. C.C. = Constant Current</li> <li>10. C.E.A. = Constant Extinction Angle</li> </ol> |
|---|---|

منابع

4- E.W. Kimbark: 'Direct Current Transmission' (Book), Vol. 1, 1971.

۵- قره‌پتیان، گ. ب. پروژه‌های کارشناسی ارشد: بررسی پخش بار AC-DC دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۸.

6- D.A. Woodford: 'Validation of Digital Simulation of DC Links', Trans. IEEE 1985, PAS-104, pp 2588-2595.

۱- احمدزاده محبوبی، بهروز. پروژه‌های کارشناسی ارشد: بررسی اتصال کوتاه در سیستم‌های AC-DC، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۶۸.

2- J. Arrillaga, C.P. Arnold: 'Computer Modeling of Power Systems' (Book), 1983.

3- J. Arrillaga: 'High Voltage Direct Current Transmission' (Book), 1983.

