

## مطالعه پدیده فرورزونانس در سیستم‌های قدرت الکتریکی

(STUDY OF FERRORESONANCE IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS)

رضا قاضی

دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده :

در این مقاله ابتدا به معرفی پدیده فرورزونانس (FERRORESONANCE) و موارد وقوع آن در سیستم‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی و همچنین در بعضی از اجزاء سیستم نظیر ترانسفورماتورهای ولتاژ (VT) پرداخته آنگاه به کمک شبیه‌سازی کامپیوتری امکان وقوع این پدیده و اثرات نامطلوب آن در یک مورد خاص، که در آن یکی از خطوط تغذیه ترانسفورماتور ولتاژ در اثر پاره‌گی، احتمال زمین می‌گردد مورد بررسی قرار داده میشود. در این بررسی تاثیر پارامترهاییکه زمینه را برای وقوع این پدیده مساعد می‌نمایند مشخص می‌گردند که در نتیجه با اعمال محدودیت بر برخی از این پارامترها در مراحل طراحی ترانسفورماتور و همچنین با روشهای دیگر میتوان از وقوع آن جلوگیری کرد. در این مطالعه از روش H.W. DOMMEL که برای بررسی مسائل گذرای الکترومغناطیسی (EMTP) بسیار مناسب است، استفاده گردیده است و اندوکتانس غیرخطی بصورت نمایی مدل شده است.

### شرح مقاله :

فرورزونانس اصطلاحی است که بمنظور توصیف پدیده رزونانس در مدارهای که حداقل دارای یک عنصر غیرخطی اندوکتیو است، بکار برده میشود مداری که شامل

ترکیب سری یک اندوکتانس قابل اشباع و مقاومت خطی و خازن است ، مدار فرورزونانس نامیده میشود.

رزونانسی که در مدار شامل راکتور خطی رخ میدهد به رزونانس خطی سری و رزونانسی که در مدار شامل راکتور قابل اشباع رخ میدهد به فرورزونانس یا رزونانس جهشی (JUMP - RESONANCE) موسوم است . بواسطه مشخصه غیرخطی راکتور ، مقدار اندوکتانس در ناحیه اشباع تابعی از درجه اشباع هسته مغناطیسی که خود وابسته به ولتاژ دو سر راکتور است ، میباشد و از این رو در ناحیه اشباع اندوکتانس میتواند مقادیر متعددی را به خود اختصاص دهد که ممکن است در هر یک از این مقادیر تحت شرایط خاصی پدیده فرورزونانس تحقق یابد . در حقیقت پدیده فرورزونانس مورد خاصی از رزونانس جهشی است که در آن غیرخطی بودن، مربوط به هسته مغناطیسی راکتور است . رزونانس جهشی به این معناست که هرگاه در سیستمی که توسط منبع سینوسی تحریک میشود، در اثر افزایش مقدار یا فرکانس ورودی و یا مقدار یکی از پارامترهای سیستم ، یک جهش ناگهانی در مقدار یکی از سیکنالهای دیگر سیستم پیش آید. این جهش میتواند در ولتاژ یا جریان و یا فلوی مغناطیسی یا در تمامی آنها ایجاد گردد.

هنگامیکه در اثر اشباع هسته مغناطیسی و تحت شرایط خاصی چنین پدیده‌ای رخ میدهد ولتاژ زیادی در دو سر راکتور ظاهر شده و جریان مغناطیس‌کننده در نقاطی که ولتاژ تغییر جهت میدهد به شکل پالس به مقدار زیادی افزایش مییابد. (شکل‌های ۱ و ۲)

#### ۱- اثرات نامطلوب فرورزونانس :

پدیده فرورزونانس در سیستم های قدرت الکتریکی اهمیت زیادی پیدا کرده است زیرا بر اساس گزارشهای متعدد در اثر وقوع این پدیده و اضافه ولتاژ و جریان پالسی ناشی از آن ، موجب داغ شدن و خرابی ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری و ترانسفورماتورهای قدرت گردیده است . اضافه ولتاژ و جریان ناشی از ، فرورزونانس میتوانند برحسب شرایط اولیه ، ولتاژ و فرکانس تحریک و مقادیر مختلف پارامترهای مدار ( کاپاسیتانس و شکل منحنی مغناطیسی ) ، مقادیر متفاوتی پیدا کنند ، بنابراین بایستی محدودیت‌هایی بر پارامترهای سیستم اعمال کرد تا از وقوع چنین پدیده ناخواسته جلوگیری نمود.

### ۱-۱- موارد وقوع فرورزونانس در سیستم‌های قدرت :

در سیستم‌های قدرت الکتریکی مواردی که در آنها احتمال وقوع فرورزونانس وجود دارد عبارتند از :

الف - ترانسفورماتورهای ولتاژ (VT و CVT)

ب - خطوط انتقال موازی EHV جابجا نشده

ج - سیستم توزیع انرژی

این پدیده معمولاً بواسطه اثر متقابل ترانسفورماتور (بدون بار یا بار کم) با کاپاسیتانس سیستم بوجود می‌آید. مثلاً اگر ولتاژی در نقطه صفر شکل موج آن به ترانسفورماتور بدون بار اعمال شود، یک جریان زیادی از مدار عبور میکند زیرا، فلوی مغناطیسی تمایل دارد که در سیکل اول مقدارش را دو برابر نماید و در نتیجه هسته به میزان زیادی اشباع میگردد، این جریان زیاد تا چند سیکل ادامه می‌یابد و در شرایط ماندگار جریان تحریک به مقدار معمولش تنزل مییابد. اما اگر چنانچه ترانسفورماتور از طریق یک خازن سری انرژی‌دار گردد این جریان غیرعادی در شرایط ماندگار نیز ادامه مییابد، این جریان حتی از جریان تمام بار نیز بزرگتر است و شکل موج جریان و ولتاژ دو سر ترانسفورماتور مطابق (شکل‌های ۱ و ۲) کاملاً اعوجاج یافته‌اند و پدیده فرورزونانس تحقق یافته است.

### ۱-۲- شروع فرورزونانس :

پدیده فرورزونانس همواره پس از وقوع یک اغتشاش فاحش، رخ میدهد. اغتشاش وارده به سیستم ممکن است منجر به تغییر افزایشی در مقدار یا فرکانس ورودی سیستم یا مقادیر پارامترهای سیستم گردد. در سیستم‌های قدرت، معمولاً اغتشاش ناشی از قطع خط ترانسفورماتور بدون بار و شرایط سوئیچینگ نامطلوب، احتمال وقوع فرورزونانس را افزایش میدهد. اغلب این پدیده در سیستم قدرتی که دارای تلفات کم است آغاز میگردد.

### ۱-۳- شرایط ادامه یافتن فرورزونانس :

همانطوریکه گفته شد وقوع فرورزونانس در سیستم‌های قدرت به شرایط اولیه مخصوصاً به انرژی اولیه ذخیره شده سیستم در زمان پس از اغتشاش وابسته است

اگر این انرژی کافی باشد اندوکتانس با هسته آهنی را به اشباع می برد و اگر برای تغذیه تلفات سیستم بقدر کافی انرژی از منبع تغذیه انتقال یابد پدیده فرورزونانس ادامه می یابد، البته مکانیزم انتقال انرژی در موارد مختلف ، متفاوت خواهد بود مثلاً در خطوط دابل EHV وقتی یکی از مدارها قطع میشود و خط دیگر انرژی دار میگردد ، انتقال توان از طریق کاپاسیتانس کوپلاژ بین دو خط ، از خط انرژی دار صورت میگیرد.

## ۲- سیستم مورد مطالعه :

سیستم مورد مطالعه ، مطابق شکل (۳) ترانسفورماتور ولتاژی است (ترانسفورماتورهای تکفاز با اتصال ستاره) که در شرایط نرمال از خط سه فاز تغذیه میشود. در این سیستم در اثر اتصال زمین فاز پاره شده (مثلاً فاز B) مدار فرورزونانس سری RLC (غیرخطی) بوجود می آید. کاپاسیتانس بین دو فاز سیستم با C مشخص گردیده است ، همانطوریکه در شکل (۳) نشان داده شده است جریان شارژ بین فازهای A و C و زمین تولید میگردد بنابراین مدار معادل (شکل ۴) بدست می آید که در صورت تکفاز بودن ترانسفورماتورها، دو مسیر L-C بوجود می آید که بعنوان مدار فرورزونانس مورد مطالعه قرار میگیرد شکل (۵). این مدار مجدداً در شکل (۶) تکرار شده است و براساس روش DOMMEL که در آن عنبر فشرده موجود (خازن و راکتور) مطابق قانون انتگرال گیری TRAPEZOIDAL مدل شده اند ، توسط معادلات کره بفرم ماتریس بصورت معادله (۱) فرموله شده است

$$\begin{bmatrix} \frac{V_{1P}}{R} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{cP-1} \\ -I_{cP-1} - I_{LP-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R} + \frac{2c}{\Delta t} & -\frac{2c}{\Delta t} \\ \frac{2c}{\Delta t} & -\left(\frac{2c}{\Delta t} + \frac{1}{2L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{2P} \\ V_{3P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2c}{\Delta t} & \frac{2c}{\Delta t} \\ -\frac{2c}{\Delta t} & \left(\frac{2c}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{2P-1} \\ V_{3P-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

معادله (۱) بفرم فشرده شکل زیر در می‌آید:

$$\{I_{N^P}\} = \{GA\} \{V^P\} + \{GB\} \{V^{P-1}\} - \{I^{P-1}\}$$

که در آن :

$\{GA\}, \{GB\}$	ماتریس کنداکتانس گره
$\{V^P\}$	ولتاژ گره در مرحله زمانی P ام
$\{V^{P-1}\}$	ولتاژ گره در مرحله زمانی (P-1) ام
$\{I^{P-1}\}$	بردارستونی جریان کاپاسیتو و اندوکتیو مرحله زمانی (P-1) ام
$\{I_{N^P}\}$	بردارستونی جریان تحریک

چون مدار شامل عنصر غیر خطی است روش فوق همراه با روش تکراری نظیر نیوتن ، رافسن معادله (۱) برای جریان عبوری از اندوکتانس غیر خطی و ولتاژ دو سر آن به کمک برنامه نوشته شده (EMTP 20) حل و نتایج ترسیم شده است . نحوه اجرای آن در شکل (۷) مشخص گردیده است .

### ۳- نمایش مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور در برنامه فوق :

نمایش مشخصه مغناطیسی در بررسی فرورزونانس اهمیت زیادی دارد . نمایش آن بصورت قطعه قطعه خطی با دو یا سه شیب توسط تعدادی از مؤلفین در این مطالعه بکار رفته است . مدل‌های دقیق‌تر نظیر مدل سری توانی (POWER SERIES) و مدل قوس تانژانت (ARC-TANGENT) در مطالعه فرورزونانس بکار رفته است . در این بررسی از مدل نمایی (EXPONENTIAL) که اجرای آن ساده و دارای دقت خوبی است ، استفاده شده است . البته با توجه به اینکه مقادیر مشخصه (V-I) را در اختیار داشته‌ایم به جای مشخصه (P-I) مشخصه (V-I) و مدل‌های زیر را در این مطالعه در نظر گرفته‌ایم :

$$V = B_1 I + B_2 [1 - \text{EXP}(-B_3 I)]$$

$$V = B_1 I + B_2 [1 - \text{EXP}(-B_3 I)] + B_4 I \text{EXP}(-B_5 I)$$

$$V = B_1 I + B_2 [1 - \text{EXP}(-B_3 I)] + B_4 I \text{EXP}(-B_5 I) + B_6 I \text{EXP}(-B_7 I)$$

که در آن V ولتاژ ترانسفورماتور و I جریان تحریک و B ها مقادیر ثابت

هستند حال به کمک مشخصه اندازه‌گیری شده موجود (V-I) شکل (A) ، به کمک روش (LEAST SQUARE) و برنامه‌های کامپیوتری ساده ، مقادیر B را برای مدلهای فوق محاسبه و نتایج در اشکال ۹ ، ۱۰ و ۱۱ رسم شده است . که خطای مدل یا منحنی واقعی مشخص است . با توجه به رابطه زیر :

$$L = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi}{dt}$$

از روی مشخصه‌های (V-I) ، مشخصه‌های (L-I) بدست می‌آید (شکلهای ۱۲ و ۱۳ و ۱۴).

### نتیجه :

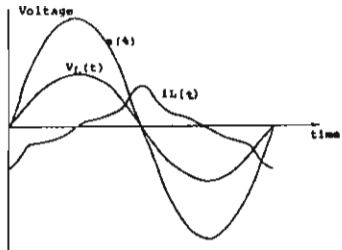
در این بررسی مدار غیرخطی RLC با منبع سینوسی با حداکثر ولتاژ V ۱۵۵۰۰ یعنی V ۱۱۰۰۰/۲ در شرایط نرمال تحریک میشود اثر پارامترهای مهم سیستم یعنی ولتاژ تحریک ، کاپاسیتانس سیستم ، مقاومت اهمی و نقطه زانوی منحنی مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته است . اثر تغییر ولتاژ تحریک با بدست آوردن شکل موج جریان عبوری از اندوکتانس و ولتاژ دو سر آن در شکل (۱۵) نشان داده شده است و نتایج نشان میدهد که تا ولتاژ پیک V ۶۰۰۰ جریان عبوری ناچیز و ولتاژ دو سر اندوکتانس اعوجاج ندارد. در ولتاژ V ۶۰۰۰ پس از ۱/۵ سیکل پدیده فرورزونانس رخ میدهد و جریان پیک تا A ۱/۵ و ولتاژ پیک تا KV ۵۰ افزایش مییابد. اثر تغییر کاپاسیتانس و مقاومت در شکل (۱۶) نشان داده شده است . اثر نقطه زانوی مشخصه (B(H) با در نظر گرفتن منحنی‌های شکل (۱۸) مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج در شکل (۱۹) نشان داده شده است و نشان میدهد که پدیده در زمانهای متفاوت رخ میدهد، و مقدار اضافه ولتاژ ایجاد شده نیز متفاوت است . همچنین اثر مدلهای ترانسفورماتور (شامل مدل قطعه قطعه خطی و مدل پیوسته نمایی) در شکل (۲۰) نشان داده شده است . مدلهای متفاوت در وقوع پدیده فرورزونانس و میزان اضافه ولتاژ بوجود آمده نقش مهمی دارند مثلاً " وقتی مدل قطعه قطعه (با دو شیب) بکار میرود در ولتاژ V ۸۰۰۰ فرورزونانس رخ میدهد و جریان پیک A ۱۰ مشاهده میشود و حال آنکه با مدل نمایی که به مدل واقعی نزدیک است در ولتاژ V ۶۰۰۰ اتفاق می افتد و جریان پیک A ۱/۵ از مدار می‌گذرد همچنین میزان اعوجاج شکل موج ولتاژ کاملاً متفاوت است و بواسطه همین تفاوتها است که در همین مطالعه از مشخصه پیوسته نمایی استفاده شده است .

از این مطالعه نتیجه‌گیری شده است که به ازاء مقدار معینی از ولتاژ

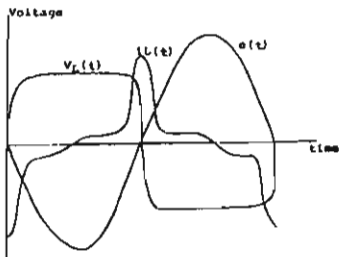
تحریک و فرکانس و مشخصه مغناطیسی معینی ، میتوان بین تغییرات  $L$ ،  $C$  و  $R$  رابطه‌ای مطابق شکل (۲۱) بدست آورد به ازاء یک مقاومت اهمی معین حداقل مقدار  $L$  که منجر به فرورزونانس میگردد با افزایش  $C$  کاهش مییابد نتایج نشان میدهد که با وارد کردن مقاومت بزرگ در مدار امکان وقوع فرورزونانس کاهش مییابد که از آن میتوان برای جلوگیری فرورزونانس در ترانسفورماتور ولتاژ استفاده نمود. طوریکه مطابق شکل (۲۲) هرگاه در موقع بروز اغتشاش فلوی مغناطیسی به حد پیش‌بینی شده (مقدار قبل از اشباع) برسد مدار کنترلسوئیچ الکترونیک  $S$  را قطع نماید تا امکان به اشباع رفتن ترانسفورماتور از بین برود. اثر تغییرات فرکانس تحریک ، بار اولیه خازن و تغییر زاویه سوئیچینگ مورد مطالعه قرار گرفته است و نتیجه‌گیری شده است که پیک جریان با افزایش فرکانس افزایش می یابد ، مدت زمان عبور جریان پالسی با افزایش بار اولیه خازن افزایش مییابد ، و تغییر زاویه سوئیچینگ چندان تأثیری در شکل موجها ندارد و تنها پیک ولتاژ در زمانهای متفاوت رخ میدهد ( به خاطر محدود بودن صفحات ، از درج بعضی گرافها خودداری شده است ) . نقش پارامترهای دیگر از آنجمله اثر هیستریزیس ، جریان فوکو رابطه بین نوسانات هارمونیک ، زیر هارمونیک با فرورزونانس نیز قابل بررسی است .

#### منابع :

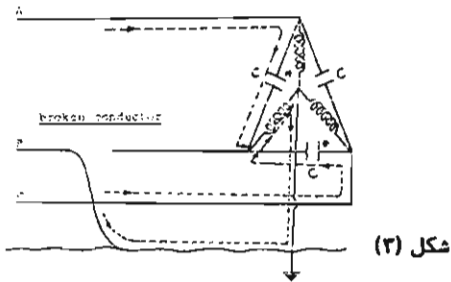
- 1- GERMAY , N, MASTERO , S , AND ROMAN, J.V.  
"REVIEW OF FERRORESONANCE PHENOMENA IN HIGH VOLTAGE POWER SYSTEM AND PRESENTATION OF A VOLTAGE TRANSFORMER MODEL FOR PREDETERMINING THEM"  
CIGRE , PARIS PAPER NO . 33- 18, 1974
- 2- DOMMEL , H.W. AND MEYER , W.S.  
"COMPUTATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS"  
PROCEEDINGS OF IEEE VOL 62 , PP 983 - 993 JULY 1974
- 3- " SINGLE - PLASE FERRORESONANCE ON A 150  $\sqrt{3}$  KV VOLTAGE TRANSFORMER  
COMPARISON OF MEASURED AND COMPUTED RESULTS /PROC .IEE , VOL . 125,  
NO - 6, JUNE 1978
- 4- KIMBARK , E .W. "FERRORESONANCE IN A TRANSFORMER SWITCHED WITH  
AN EHV LINE" IEEE TRANS . PAS - 91, NO.3 , 1972



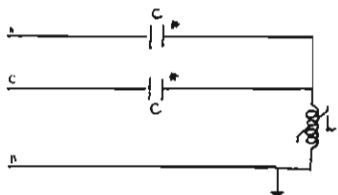
Before Jump (1) شکل



After Jump (2) شکل

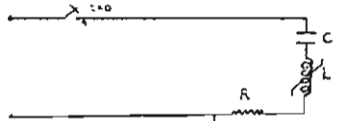


Broken conductor to ground showing current paths for ferroresonance.  
C equivalent phase to phase capacitance



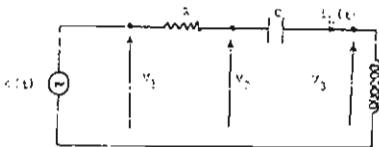
(4) شکل

The essential circuit for ferroresonance from fig. 3



(5) شکل

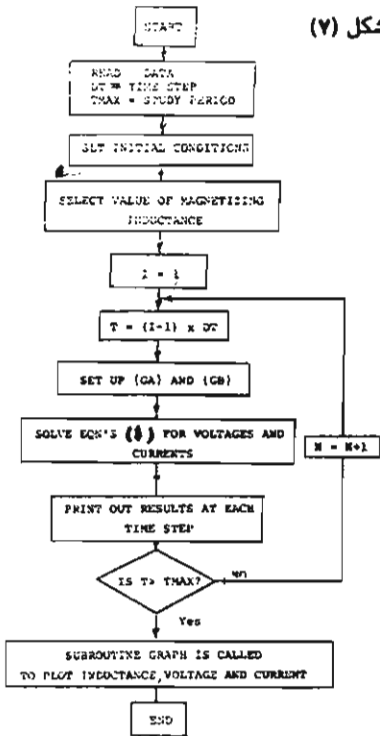
Ferroresonance circuit for one phase of V.T. when switch closed



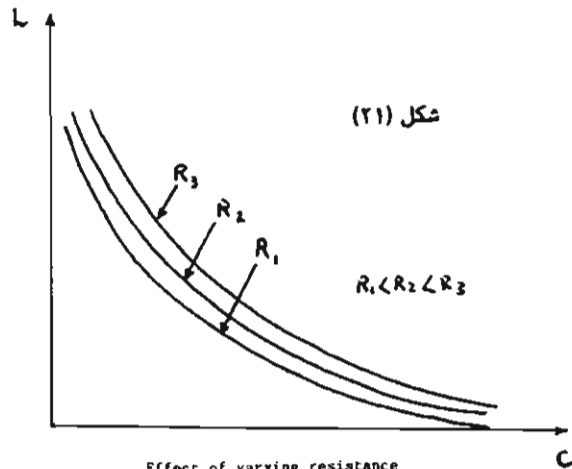
Equivalent circuit

(6) شکل

DETERMINATION OF...

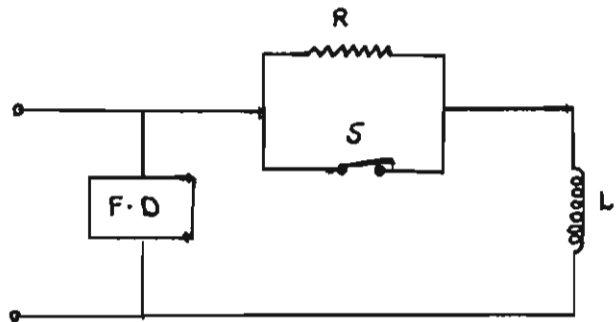


(7) شکل



(21) شکل

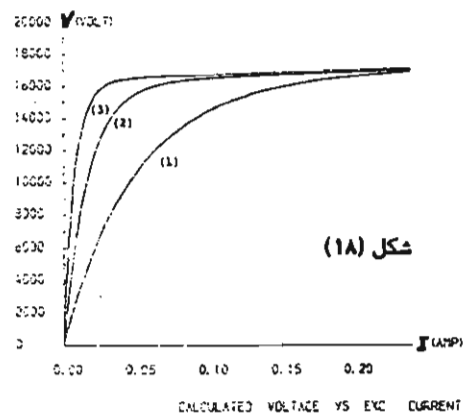
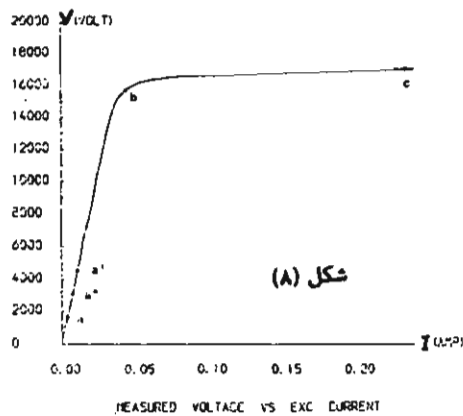
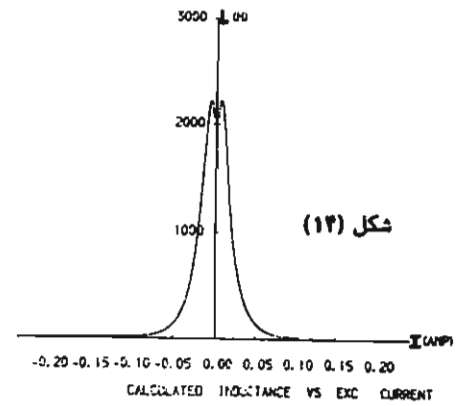
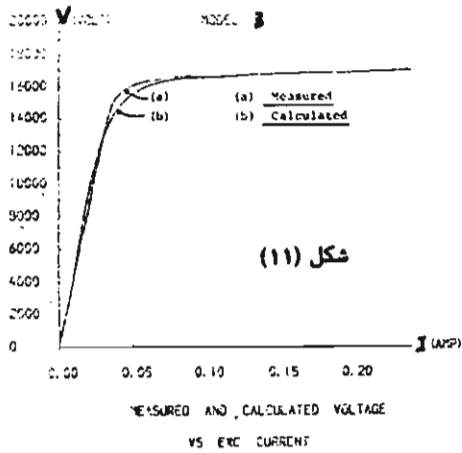
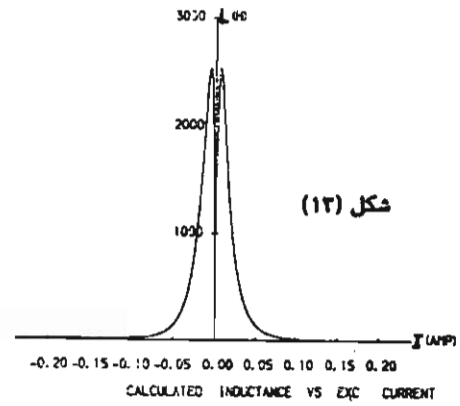
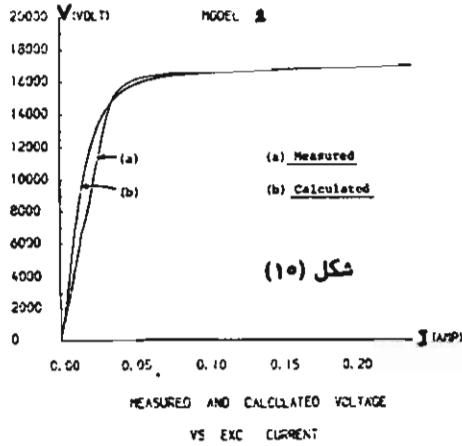
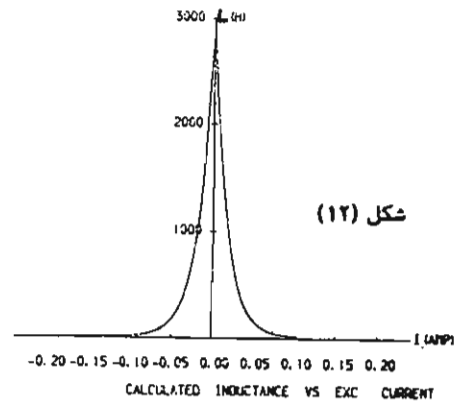
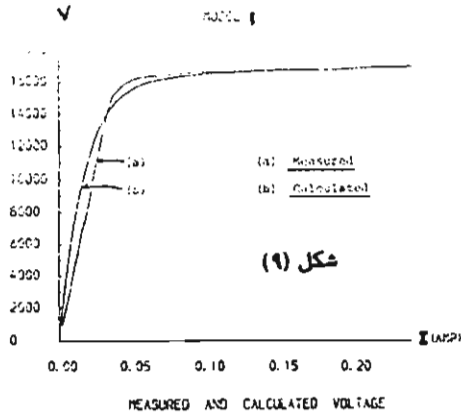
Effect of varying resistance On Ferroresonance parameter



F.D = Flux amplitude detector  
S = Electronic switch

(22) شکل



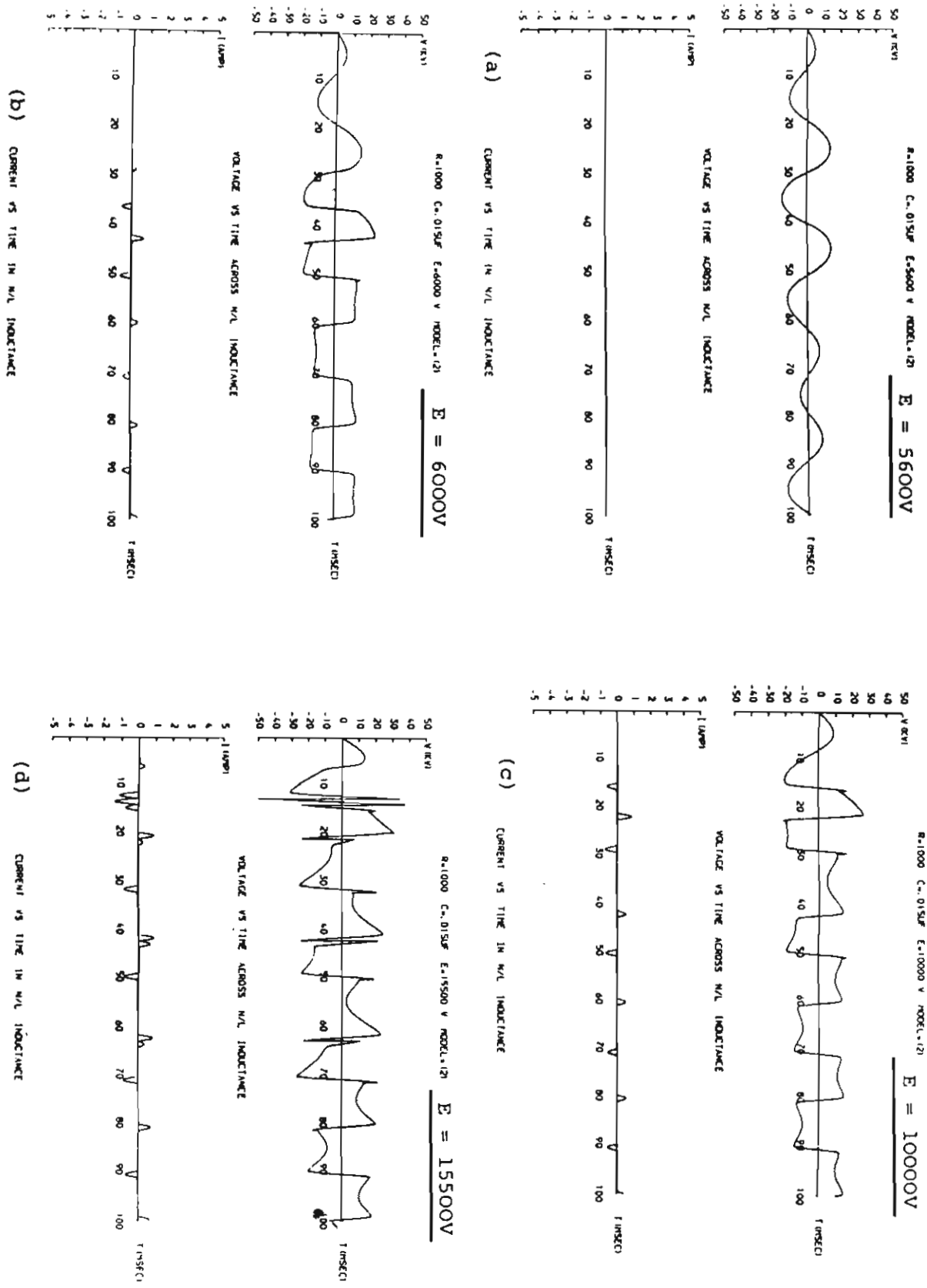


Effect of varying the excitation voltage

Model(2) :  $\phi = B_1 I + B_2 (1 - \exp(-B_3 I))$

$R = 1000 \Omega$     $C = 0.015 \text{ UF}$

شكل (15)

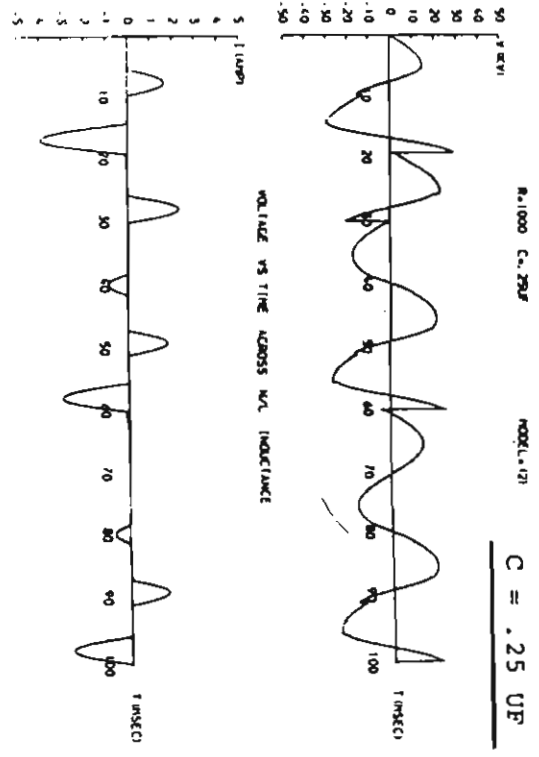


Effect of varying the line capacitance

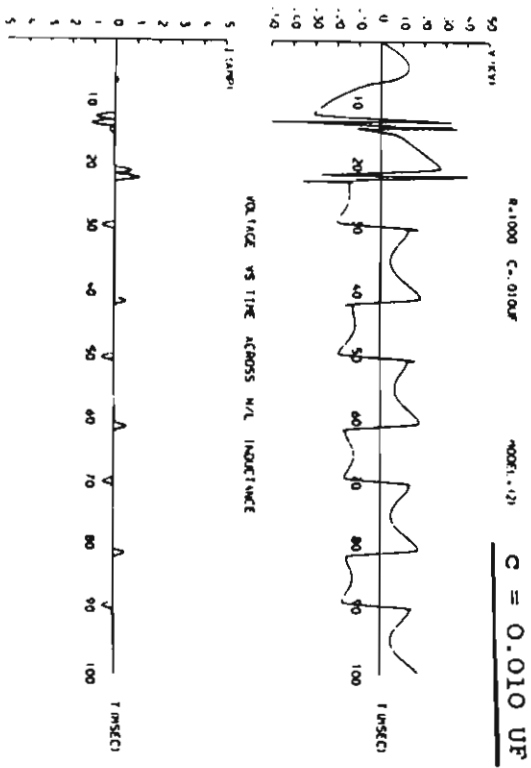
$$\text{model } \phi = B_1 I + B_2 (1 - \exp(-B_3 I))$$

$$R = 1000 \Omega \quad E = 15500 \text{ V}$$

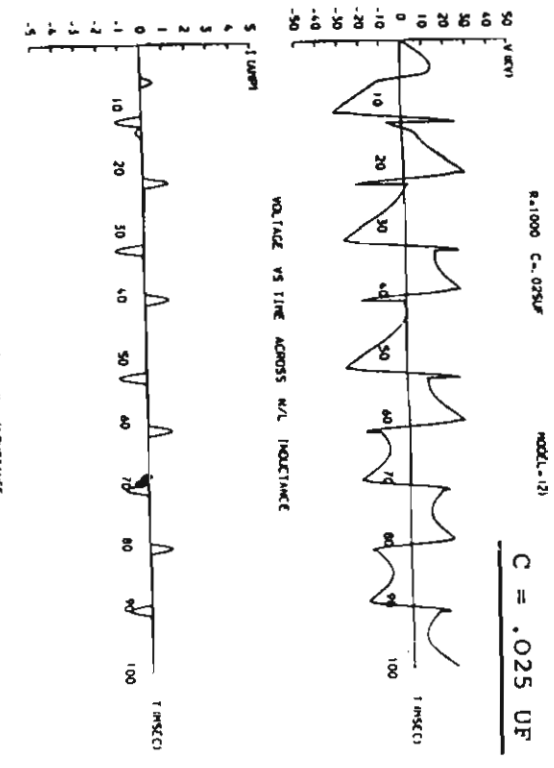
شکل (۱۶)



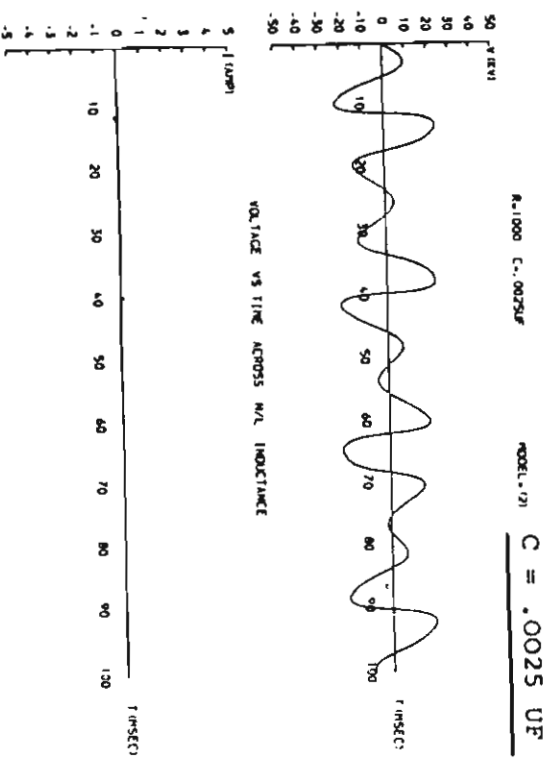
(a) CURRENT VS TIME IN N/L INDUCTANCE



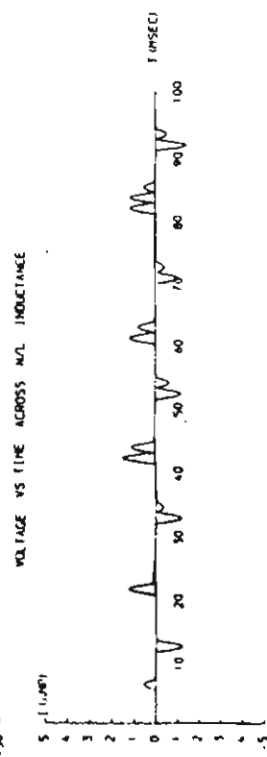
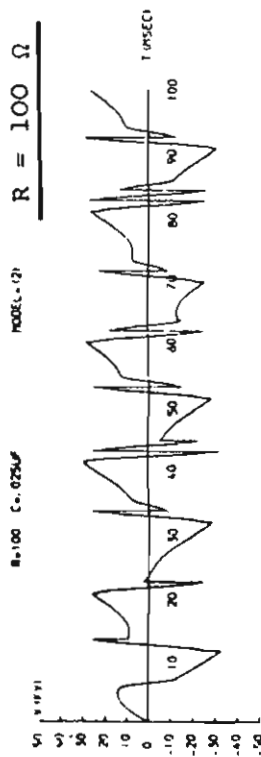
(b) CURRENT VS TIME IN N/L INDUCTANCE



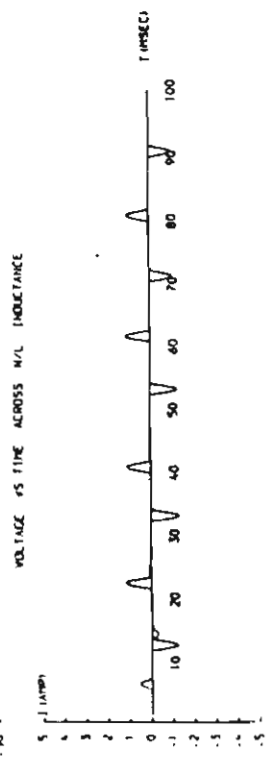
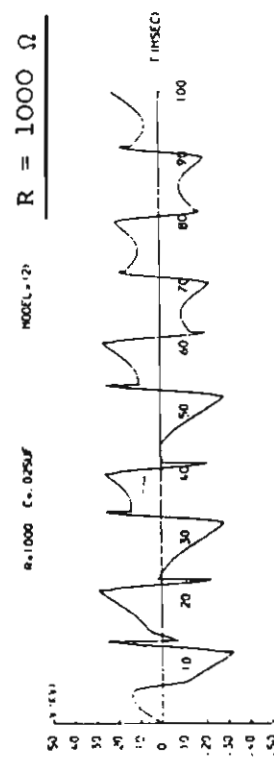
(c) CURRENT VS TIME IN N/L INDUCTANCE



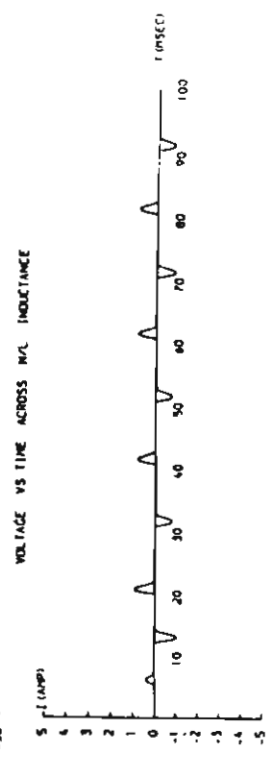
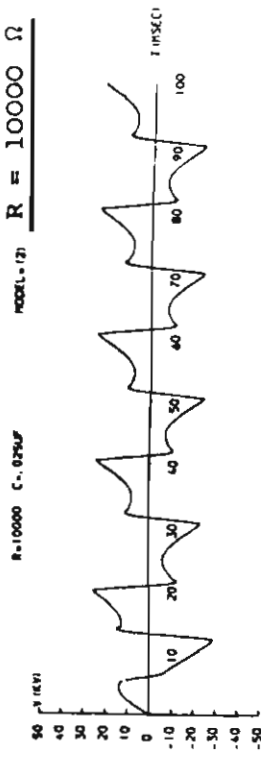
(d) CURRENT VS TIME IN N/L INDUCTANCE



(a)



(b)



(c)

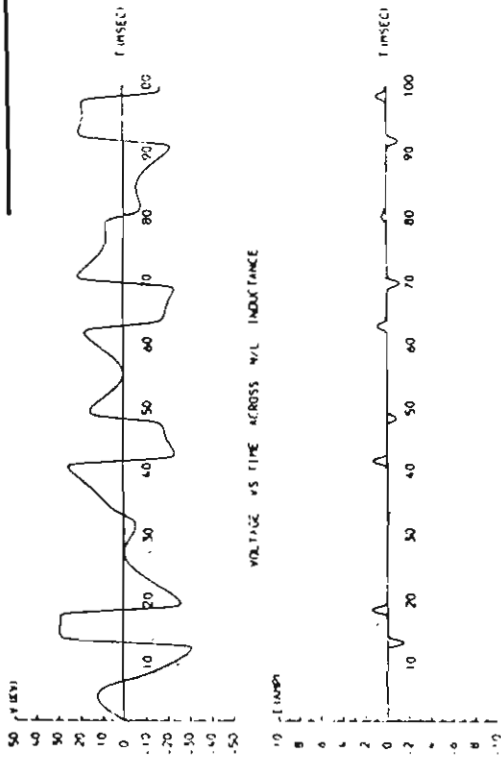
Effect of varying the circuit resistance

model :  $\phi = B_1 I + B_2 (1 - \exp(-B_3 I))$

C = 0.025 UF E = 15500 V

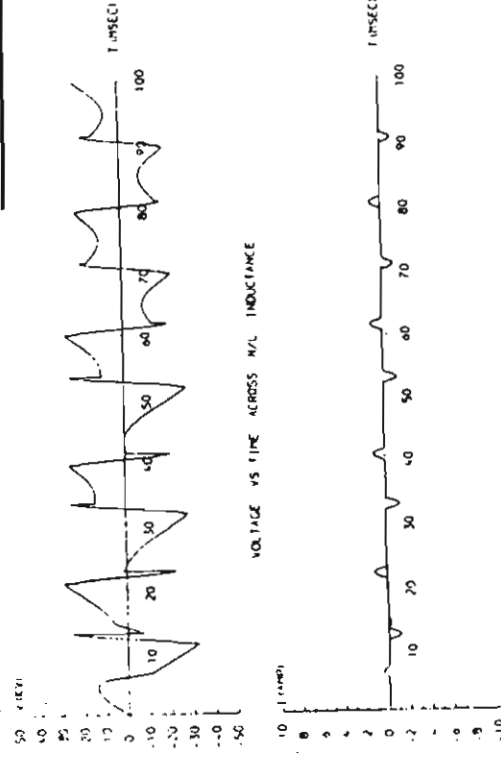
شکل (۱۷)

R=1000. C=.025UF WITH CURVE (1) MODEL=(2) with curve (1)



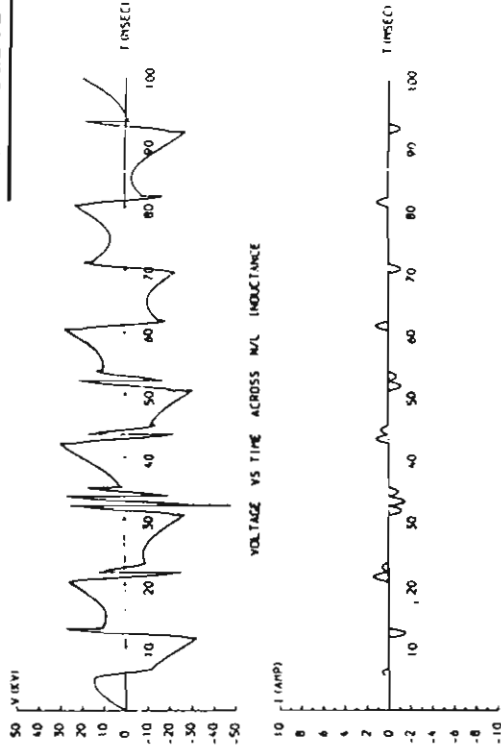
(a) CURRENT VS TIME IN M/L INDUCTANCE

R=1000. C=.025UF WITH CURVE (2) MODEL=(2) with curve (2)



(b) CURRENT VS TIME IN M/L INDUCTANCE

R=1000. C=.025UF WITH CURVE (3) MODEL=(2) with curve (3)



(c) CURRENT VS TIME IN M/L INDUCTANCE

Effect of varying magnetic characteristic

(curves 1,2 and 3 of Fig 8)

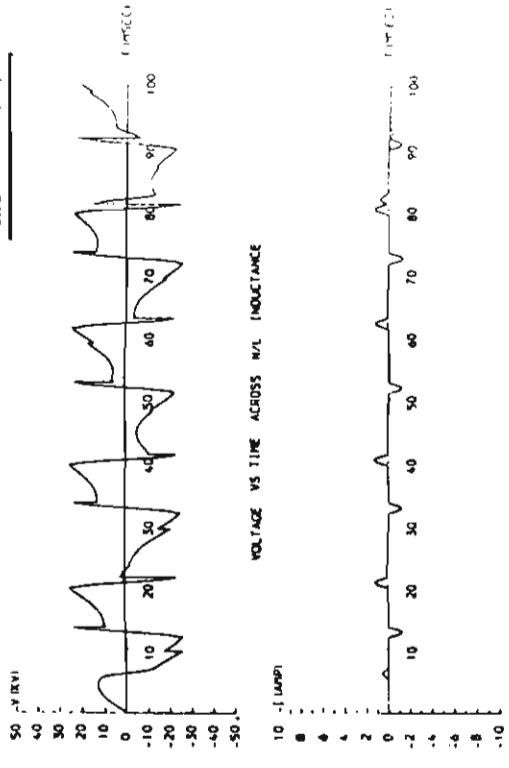
model :  $\phi = B_1 I + B_2 (1 - \exp(-B_3 I))$

R = 1000  $\Omega$  C = 0.025 UF

E = 15500 V

شکل (۱۹)

R = 100 C = 0.025UF MODEL = (3) model (3)



(c) CURRENT VS TIME IN N/L INDUCTANCE

Effects of the different models for  $(\phi-I)$  characteristic.

R = 100  $\Omega$  C = 0.025 UF E = 15500 V

model (1) : piecewise-linear

model (2) : exponential model

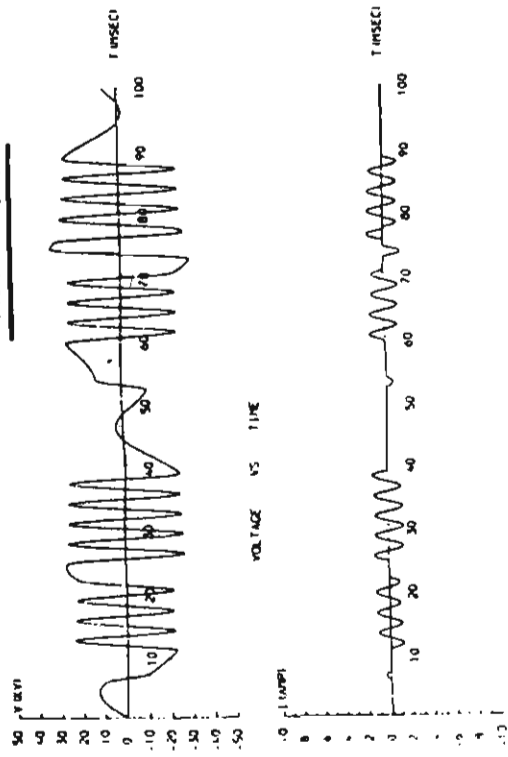
$$\phi = B_1 I + B_2 (1 - \exp(-B_3 I))$$

model (3) : exponential model

$$\phi = B_1 I + B_2 (1 - \exp(-B_3 I)) + B_4 I \exp(-B_5 I) + B_6 I \exp(-B_7 I)$$

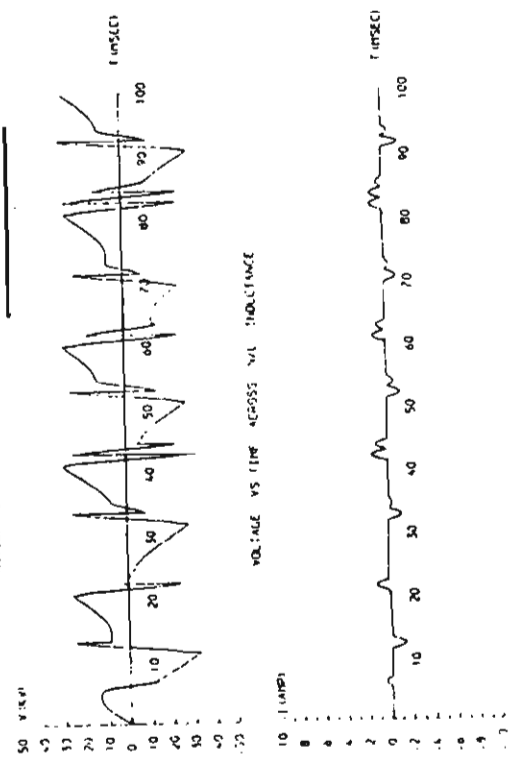
شكل (٢٠)

R = 100 C = 0.025UF MODEL = (1) model (1)



(a) CURRENT VS TIME

R = 100 C = 0.025UF MODEL = (2) model (2)



(b) CURRENT VS TIME IN N/L INDUCTANCE