بهبود پایداری عددی تخمین حالت سیستم‌های قدرت با حفظ ساختار معادلات نرمال سیستم

مهندس محسن نایب‌زاده

مربی دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده

روش استاندارد حل کمترین مربعات وزنی (WLS)، تخمین حالت سیستم‌های قدرت، به‌صورت الگوریتم تکرار می‌باشد که در بسیاری موارد به‌ناهنجار شدن ماتریس گین (اطلاعات) منجر می‌گردد. برای غلبه بر این مشکل راه‌حلهای متفاوتی پیشنهاد شده است. در این مقاله مطالعه جامعی بر روی سه روش تخمین حالت که از همان ساختار معادلات نرمال (NE) استفاده می‌کنند انجام شده و مقایسه‌ای از جنبه‌های مختلف انجام گرفته است. تغییرات لازمه جهت به‌کارگیری هریک از روش‌ها بر روی روش استاندارد WLS بررسی و نتایج به‌دست آمده بر روی سیستم استاندارد IEEE30-BUS نمایش داده شده است.

Improvement of Numerical Stability of Power System State Estimation Using Structure Preserving of Normal Equations

M. Nayebzadeh, M.Sc.

Elect. Eng. Dept. Tehran Univ.

ABSTRACT:

The standard approach to the solution of the Weighted Least Square (WLS) state estimation in power systems is the iterative algorithm which results in ill-conditioning of the Gain Martix in many cases. several methods have been proposed to circumvent the problem. In this paper a comparative study of three methods for state estimation which use the same structure of N.E. has been conducted and comparison is made in terms of different aspects. The modifications needed to implement each method on an existing standard WLS are investigated and test results on the standard IEEE 30-Bus system are presented.

مقدمه

تخمین حالت سیستم‌های قدرت به‌کمک روش کمترین مربعات و نی کاربرد زیادی در سیستم‌های قدرت پیدا نموده است [۲ و ۱] و در بسیاری موارد نیز به‌خوبی انجام وظیفه نموده، ولی دیده شده که در بعضی موارد از جمله اتصال خطوط با طول زیاد به‌خطوط با طول کم یا در مواردی که فراوانی محلی دستگاههای اندازه‌گیری کم باشد (کمتر از ۱/۲) یا در مواردی که وزن داده شده به‌بعضی مشاهدات در قیاس با بقیه خیلی زیاد باشد (واریانس مشاهده کم باشد) ماتریس گین ناهنجار شده (ill-Conditioned) وروش‌تکرار همگرا نشده یا در تکرارهای زیاد به‌جواب رسیده است.

روشهای ارائه شده برای غلبه بر این مشکل زیاد بوده و تزهای دکتری زیادی به‌خود اختصاص داده است، از آن جمله می‌توان روش معادلات نرمال تحت محدودیت NE/C، روش Hachtel، روش هایبرید، و روش تبدیل‌های ارتوگونال سطری یا ستونی را نام برد که در این مقاله به‌سه روش آخر پرداخته می‌شود. روش تبدیل ارتوگونال پایداری عددی بهتری را فراهم ساخته اما، خلوتی (Sparsity) ماتریس به‌مقدار زیادی از دست می‌رود و به‌کارگیری آن در حالت دکوپله نیز با دشواری همراه می‌شود. در حالی که در قیاس با آن روش هایبرید از همان برتری پایداری عددی سود

جسته و خلوتی ماتریس‌ها را حفظ می‌نماید .

هر دو روش از همان ساختارهای معادلات نرمال استفاده می‌نمایند . ترتیب بحث بدین‌صورت است که ابتدا در قسمت دوم معادلات اساسی تخمین حالت بیان شده و در ضمیمه (۱) مثالی از شبکه‌ای که به‌حالت ناهنجاری می‌رسد ارائه شده است [۳] . در بخش سوم روش ارتوگونال را در دو حالت سطری و ستونی مورد بحث قرار می‌دهیم و در قسمت چهارم روش‌ها هایبرید بیان می‌گردد . مزایا و معایب روش‌ها و مقایسه آنها با هم در قسمت پنجم مقاله انجام شده و در قسمت ششم نتیجه‌گیری خواهیم کرد .

۲ــ روش کمترین مربعات وزنی

معادله غیرخطی تخمین حالت سیستم قدرت عبارت است از : [۴]

$$Z = h(x) + v \qquad (1)$$

که در آن Z بردار مشاهدات یا اطلاعات ارسالی از طریق دستگاههای اندازه‌گیری شبکه به‌مرکز کنترل انرژی(ECC) بودهٔ و mx1 بعدی است که عموما" توان‌های اکتیو ، راکتیو و اندازه‌های ولتاژ گره‌ها می‌باشد . x بردار nx1 بعدی متغیرهای حالت شامل اندازه‌های ولتاژ و زوایای آنها مربوط به‌ولتاژ گره‌ها بوده و h(.) بردار mx1 بعدی معادلات غیرخطی است که همان معادلات پخش بار خواهد بود و v نیز بردار nx1 بعدی نویز مشاهدات است . تخمین حالت x با مینی‌مم نمودن تابع کمترین مربعات وزنی J انجام می‌شود :

$$J(x) = [\,Z - h(x)\,]^t\, W [\,Z - h(x)\,] \qquad (2)$$

که W ماتریس mxm وزنی است و قطری می‌باشد . وزن معمول داده شده عکس واریانس هر مشاهده یعنی $W = R^{-1}$ است . عمل تخمین معمولا" با الگوریتم تکرار انجام شده و تصحیح بردار حالت در هر مرحله Δx از معادله (۳) به‌دست می‌آید :

$$G(x)\,\Delta x = H^T(x)\, W\, \Delta Z \qquad m \geqslant n \qquad (3)$$

که در آن :

$$G(x) = H^T(x)\, W\, H(x) \text{ و } H(x) = \frac{dh}{dx} = \text{ماتریس ژاکوبین} \qquad \Delta Z = Z - h(x) \qquad (4)$$

در معادلات (۴) $x = x_k$ یعنی در تکرار k ام می‌باشیم . معادلات (۳) همان معادلات WLS بوده و مساله کمترین مربعات وزنی نیز به‌صورت زیر فرموله می‌شود :

$$\min J(x) = (\,\Delta Z - H(x)\,\Delta x\,)^T\, W\, (\,\Delta Z - H(x)\,\Delta x\,) \qquad (5)$$

حل معادله ۳ به‌کمک تجزیه خولسکی ماتریس $G = U^T U$ انجام شده و علاوه بر این عموما" ماتریس‌های G و H در تکرارهای مختلف ثابت مانده و آنها را حداکثر پس از تکرار دوم ثابت می‌گیرند [۵] .

۳ــ روش تبدیل ارتوگونال

الف ــ تبدیل ستونی :

در نظریه سیستم‌های کنترل این روش‌را تحت عنوان فیلتر نمودن ریشه دوم منفصل بحث می‌نمایند (Discrete square root filtering) ، به‌منظور سادگی تبدیلی را بر سیستم خطی شده :

$$\Delta Z = H(x)\,\Delta x + v \qquad (6)$$

اعمال نموده تا ماتریس کواریانس نویز را از R به‌واحد تبدیل نماید [۶] ، دراین‌صورت مشاهده جدید Δy بوده که آنرا مشاهدات تغییر یافته m.m (Modified Measurement) نامیده‌ایم .

$$E(vv^T) = R \triangleq R^{1/2}(R^{1/2})^t \rightarrow E(\,(R^{1/2}v)\,(R^{-1/2}v)^T\,) = R^{-1/2}\, E(vv^T)\,(R^{-1/2})^t = R^{-1/2}\, R\,(R^{-1/2})^t = I$$

$$\Delta y = R^{-1/2}\Delta Z = R^{-1/2}H(x)\,\Delta x + \eta = G'(x)\,\Delta x + \eta \;,\; E(\eta\,\eta^t) = I \qquad (7)$$

اکنون ماتریس ارتوگونال mxm ، Q در نظر می‌گیریم و به‌صورتی انتخاب می‌نمائیم که :

$$QG' = u \triangleq \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \cdots \\ o \end{bmatrix} \qquad (8)$$

که $\hat{u}$ ماتریس بالامثلثی nxn است ، با ادامه محاسبات :

$$Q\,\Delta y \triangleq \begin{bmatrix} c \\ \cdots \\ d \end{bmatrix} \qquad (9)$$

$$J = \|\Delta y - G'\Delta x\|^2 = \|Q\,\Delta y - QG'\,\Delta x\|^2$$

$$= \left\| \begin{bmatrix} c \\ \cdots \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ \cdots \\ o \end{bmatrix} \Delta x \right\|^2$$

$$J = \left(\begin{bmatrix} c \\ \cdots \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ \cdots \\ o \end{bmatrix} \Delta x \right)^t \left(\begin{bmatrix} c \\ \cdots \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ \cdots \\ o \end{bmatrix} \Delta x \right) =$$

$$= \left([\,c : d\,] - [\,u^t : o\,]\,\Delta x \right) \left(\begin{bmatrix} c \\ \cdots \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ \cdots \\ o \end{bmatrix} \Delta x \right)$$

اگر $\hat{u}\,\Delta x = c \Rightarrow J = \|d\|^2 = \sum_{i=1}^{m-n} d_i^2$ (۱۰)

در این حالت تبدیل Q از حاصل‌ضرب تبدیل‌های ارتوگونال P_i به‌صورت $Q = \prod_{i=1}^{n} P_i$ تشکیل شده که بر n ستون G' اعمال می‌شوند و علاوه بر این هر تبدیل P_i بنحوی تعریف می‌شود که عناصر زیر قطر اصلی ستون i ام ماتریس G' را صفر نماید و نبایستی بر ستونهایی که قبلا" تحت تبدیل‌های p_1 تا p_{i-1} قرار گرفته‌اند اثری داشته باشد . تعریف دقیق عناصر p_1 تا p_n در [۴و۷] آمده و به‌کمک اعمال این تبدیل از کار نمودن با ماتریس گین خلاص شده و تنها با (۱۰) کار می‌نمائیم که آنهم با جایگذاری معکوس سریعا" حل شده و سیستم ما کلا" هنجار (conditioned) شده است .

می‌توان تبدیل فوق را به‌حالت دکوپله معادلات هم اعمال نمود [۵] که چه در حالت دکوپلینگ مدل و یا دکوپلینگ پارامتر قابل انجام است ، عیب اعمال تبدیل فوق پرشدگی در ماتریس H است که برای‌رفع این نقیصه از الگوریتم‌های مرتب نمودن ستونها (ordering) می‌توان استفاده نمود [صفحات ۱۲۱–۱۱۴ مرجع ۸]

ب) تبدیل سطری (تخمین‌زننده ترتیبی)

در این روش [۱۰ و۹] مشاهدات هریکی در یک لحظه پردازش می‌شوند و تبدیل اعمال شده سطر به‌سطر جلو می‌رود و در حقیقت با اضافه شدن هر مشاهده جدید یک سطر به‌ماتریس ژاکوبین اضافه شده و لذا استفاده از پردازش سطر به‌سطر باعث می‌شود که بدون تغییر در تبدیلهای P_i با اضافه شدن سطر جدید تنها تبدیل جدیدی که بایستی به‌آن سطر اعمال شود را ، به‌دست آوریم و این خود در شناسایی اطلاعات بد ، بسیار مفید خواهد بود (Bad data detection) بدین‌صورت که می‌توان کلیه محاسبات را تا مرحله حذف اطلاعات بد مجددا" به‌کار گرفت ، در حالی‌که در WLS معمولی تمام محاسبات بایستی مجددا" تکرار شده و در تبدیل ارتوگونال ستونی نیز بایستی

محاسبات مجددا" تکرار گردد و این بزرگترین مزیت تخمین‌زننده ترتیبی است ، در ابتدا فرض کنیم n مشاهده و n حالت داریم و مدل مشاهدات به‌صورت زیر داده شده باشد :

$$\Delta y = G' \Delta x + \eta \ , \ E(\eta \eta^t) = I \qquad (۱۱)$$

$$J = (\Delta y - G' \Delta x)^t (\Delta y - G' \Delta x) \qquad (۱۲)$$

فرض شود مشاهده جدید به‌صورت $\Delta \tilde{y} = g^t \Delta x + \tilde{\eta}$ باشد که با اضافه شدن آن :

$$\tilde{J} = J + (\Delta \tilde{y} - g^t \Delta x)^2 \qquad (۱۳)$$

$$\tilde{J} = \left\{ \begin{bmatrix} G' \\ \cdots \\ g^t \end{bmatrix} \Delta x - \begin{bmatrix} \Delta y \\ \cdots \\ \Delta \tilde{y} \end{bmatrix} \right\}^t \left\{ \begin{bmatrix} G' \\ \cdots \\ g^t \end{bmatrix} \Delta x - \begin{bmatrix} \Delta y \\ \cdots \\ \Delta \tilde{y} \end{bmatrix} \right\}$$

$$= \left\| \begin{bmatrix} G' \\ \cdots \\ g^t \end{bmatrix} \Delta x - \begin{bmatrix} \Delta y \\ \cdots \\ \Delta \tilde{y} \end{bmatrix} \right\|^2 \qquad (۱۴)$$

که رابطه (۱۴) مربوط به‌سیستم توسعه یافته می‌باشد ، اکنون با اعمال تبدیل ارتوگونال Q داریم :

$$Q \begin{bmatrix} G' \\ \cdots \\ g^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \cdots \\ o \end{bmatrix} , \ Q \begin{bmatrix} \Delta y \\ \cdots \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W \\ \cdots \\ \tilde{e} \end{bmatrix} , \ \hat{u}\ (n \times n)\text{بالا مثلثی}, W(n \times 1),$$

$$\tilde{e}(1 \times 1) \qquad (۱۵)$$

$$\tilde{J} = [w - \hat{u} \Delta x]^t [w - \hat{u} \Delta x] + \tilde{e}^2 \qquad (۱۶)$$

و لذا x ای که J را مینی‌مم نماید حل $\hat{u} \Delta x = W$ است و $\tilde{e}^2$ مجذور باقیمانده خواهد بود ، با آمدن هر مشاهده جدید تنها کافی است $Q \Delta \tilde{y} = \tilde{e}$ را انجام و باقیمانده جدید را به Σ قبلی افزود و تنها مساله این است که T بایستی سطر به‌سطر کار کند تا مفید باشد .

۴ـ روش هایبرید

عیب عمده دو روش عنوان شده همان از دست رفتن خلوتی ماتریس‌ها پس از اعمال تبدیل ارتوگونال Q است ، روش هایبرید این حسن را دارد که ضمن داشتن پایداری عددی برتر (حسن تبدیل ارتوگونال) ، خاصیت خلوتی معادلات (۳) را هم حفظ می‌کند ، مشابه تبدیل ارتوگونال Q بر G' اعمال می‌شود :

$$QG = \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \cdots \\ o \end{bmatrix} \qquad (۱۷)$$

می‌توان نوشت :

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ \cdots \\ Q_2 \end{bmatrix} \Rightarrow Q_1 G = \hat{u} , \ Q_2 G = 0 \qquad (۱۸)$$

$$\hat{u} \Delta x = Q_1 \Delta y \iff u^t u \Delta x = \hat{u}^t Q_1 \Delta y = G'^t Q_1^t Q_1 \Delta y \qquad (۱۹)$$

$$\hat{u}^t \hat{u} \Delta x = G'^t (Q_1^t Q_1 + Q_2^t Q_2) \Delta y = G'^t \Delta y = H^T W \Delta Z \qquad (۲۰)$$

با مقایسه با رابطه (۳) :

$$G(x) = \hat{u}^t \hat{u} \qquad (۲۱)$$

دو نتیجه از رابطه (۲۱) قابل استنتاج است :

۱) روش هایبرید معادل روش ارتوگونال است .

۲) $\hat{u}$ در معادله (۲۱) همان تجزیه خولسکی ماتریس G است با این تفاوت که به‌جای تجزیه G ، اجزاء آن از راه دیگری پیدا شده‌اند .

چه از تبدیل ستون به‌ستون و یا سطر به‌سطر استفاده شود . با قدری تغییر روابط قبل تکرار می‌شوند و با عملیات فوق منشاء ناهنجار شدن کنار گذاشته شده و چون خلوتی u به مرتب نمودن ستونهای H بستگی دارد . لذا u می‌تواند همان خلوتی H را داشته باشد ، البته نتایج نشان می‌دهند که در تبدیل سطر به‌سطر می‌توان با مرتب نمودن بهینه سطرها کمتر دچار پرشدگی شد .

۵ـ مقایسه تست‌ها [۱۴ و ۱۳ و ۱۰]

سیستم به‌کار رفته در مقایسه نتایج همان شبکه ۳۰ شینه استاندارد IEEE است ، حالت ناهنجار شدن با تغییر در ساختار دستگاههای اندازه‌گیری به‌دست آمده (B) ، بحث در دو حالت A و B انجام شده که حالت B به‌ناهنجار شدن معادلات NE منجر شده است .

حالت	روش	زمان (ثانیه)	تکرار
A	معادلات نرمال	۳/۶۹	۵
	تبدیل ستونی	۳/۷	۶
	تبدیل سطری	۱/۴۸	۶
	روش هایبرید	۱/۳	۵
B	معادلات نرمال	—	—
	تبدیل ستونی	۲/۷۹	۶
	تبدیل سطری	۱/۲۵	۶
	روش هایبرید	۱/۲	۵

جدول (۱)

جدول (۱) نشان می‌دهد که معادلات NE در حالت B به‌شرایط واگرایی رسیده‌اند ، در حالی که با اعمال تبدیلهای ارتوگونال ، چه سطری و چه ستونی ، و یا با روش هایبرید سیستم همگرا شده و زمان و تعداد تکرارها نیز کمتر شده است . در مجموع از دو روش تبدیل سطری یا ستونی ، تبدیل سطری هم زمان کمتر و هم تکرار کمتری نیاز دارد . ضمن این که آشکارسازی خطا نیز به‌توسط آن راحتتر بوده و لذا بر تبدیل ستونی ارجح است .

به‌وضوح از معادلات و نتایج برای دو حالت نمونه‌ای A و B ، برتری زمانی و پایداری عددی روش‌های ارتوگونال بر معادلات نرمال روشن است . این نتیجه بدون مثال هم ، قابل دسترسی است . زیرا در روش NE عدد هنجاری (condition number = c.n) ماتریس G مجذور c.n ماتریس H است و لذا با توان دو (۲) مقدار آن زیاد می‌گردد که به‌وضوح حساسیت بیشتری نسبت به‌ناهنجار شدن از خود نشان می‌دهد . اما ضعف عمده تبدیل ارتوگونال این است که نمی‌تواند به‌سادگی از مزایای دکوپلینگ توان راکتیو از زاویه و توان اکتیو از قدرمطلق ولتاژ ، استفاده نماید ، کاری که در پخش بار انجام می‌دهیم

و در تخمین حالت هم می‌توان در H استفاده نمود [۵] . استفاده از NE در حالت دکوپله سرعت جواب را بسیار زیاد نموده و اگر حالت ناهنجاری نداشته باشیم ، بر روش تبدیل ارتوگونال برتر می‌نماید ، ضمن این که در روش تبدیل ارتوگونال لازم است ماتریس Q یا تجزیه‌های P_i آنرا ذخیره نمائیم که خود حجم حافظه زیادی را اشغال می‌نماید (توجه شود که Q خلوت نمی‌باشد) .

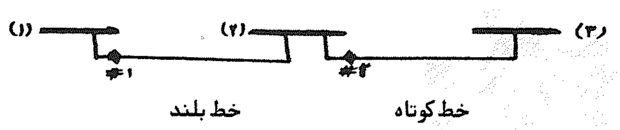
با تغییر ضرایب وزنی از ۴ تا 4×10^5 ، تعداد تکرارهای موردنیاز محاسبه شده است و دیده شده که با عبور ضرایب وزنی از محدوده ۲۰۰ به‌بالا تعداد تکرارهای روش هایبرید بیش از روش ارتوگونال شده و در ضرایب وزنی حدود 4×10^4 ، سه تکرار بیش از روش ارتوگونال دارد . در حقیقت می‌توان ادعا نمود که روش تبدیل ارتوگونال نسبت به‌تغییرات ضرایب وزنی حساسیت کمتری از خود نشان می‌دهد و در مثال مورد بحث ما روش هایبرید از حدود $W=10^5$ تمایل به‌واگرایی نیز دارد و از این رو در کل پایداری عددی تبدیل ارتوگونال بیش از روش هایبرید می‌باشد .

۶ـ نتیجه‌گیری

چنانچه ناهنجاری ماتریس گین در تخمین حالت سیستم‌های قدرت به‌وجود آید ، با حفظ ساختار معادلات N.E. می‌توان سه روش برای غلبه بر آن به‌کار برد که در کل روش تبدیل ارتوگونال بر روش هایبرید برتری دارد (از نظر عددی) ، این برتری عددی در ضرایب وزنی زیر 4×10^4 حذف شده و دو روش پایداری عددی یکسانی را نشان می‌دهند ، ضرایب وزنی بالا در مواردی رخ می‌دهند که شینه‌های با تزریق خالص صفر در سیستم قدرت وجود داشته باشند . (پست‌های کلیدزنی) در این‌موارد مشاهدات تزریق در این شینه‌ها خطای صفر داشته و ضریب وزنی مربوطه بسیار بزرگ خواهد شد ، این عیب را با اضافه کردن این مشاهدات به‌صورت محدودیت به‌معادلات نرمال برطرف نموده‌اند و روش NE/C از همین ایده ناشی شده است . اما هنوز روش هایبرید با محدودیت معرفی نشده و کار و تحقیق بر روی آن ادامه دارد . از طرف دیگر روش ارتوگونال به‌حالت دکوپله قابل اعمال نمی‌باشد و این نیز عیب این روش است ، با ذکر این نکته که N.E. سریع در حالت دکوپله زمان کمتری از تبدیل ارتوگونال صرف می‌کند .

در کل چنین پیشنهاد می‌گردد که اگر در سیستم باس‌های با تزریق صفر خالص وجود دارند ، استفاده از روش تبدیل ارتوگونال بهتر بوده و نوع سطر به‌سطر آن نیز ارجح است ، ضمن این که خاصیت آشکارسازی اطلاعات بد (Bad data) نیز آن را برتر می‌سازد و درصورت عدم وجود این باس‌ها ، بهتر است از روش هایبرید استفاده گردد ، روش هایبرید برخلاف روش‌های استاندارد NE/C, Hachtel می‌تواند با موفقیت برای آشکارسازی خطا نیز به‌کار رود ، توضیحاً " توسط wu در [۱۵] روش Hachtel بنحوی جهت آشکارسازی خطا به‌کار رفته و توسط مولف این مقاله نیز روش NE/C در حالت آشکارسازی اطلاعات به‌کار گرفته شده است .

پیوست ۱



$Z_{12} = 0 + j1$

$Z_{23} = 0 + j4$

اندازه‌گیری توان خط

در مثال ارائه شده یک خط کوتاه به‌خط طویل متصل شده و برای نمایش ناهنجاری تخمین حالت DC مورد بحث قرار گرفته است و برای سادگی ضرایب وزنی یک فرض می‌شود ، ماتریس‌های ژاکوبین و گین خواهد بود :

$$H = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \varepsilon^{-1} & -\varepsilon^{-1} \end{bmatrix} \qquad G = H^T H = \begin{bmatrix} 1+\varepsilon^{-2} & -\varepsilon^{-2} \\ -\varepsilon^{-2} & \varepsilon^{-2} \end{bmatrix}$$

بهنگام ذخیره در کامپیوتر برای $\varepsilon < 10^{-4}$ ماتریس گین به‌صورت زیر ذخیره خواهد شد :

$$G = \begin{bmatrix} \varepsilon^{-2} & -\varepsilon^{-2} \\ -\varepsilon^{-2} & \varepsilon^{-2} \end{bmatrix}$$

که دراین‌صورت G ویژه (singular) می‌شود ، در این مثال تزریق توان نداریم و ضرایب وزنی هم بزرگ نبوده است .

1. Merril & F.C. Schweppe - "Bad Data Suppression in Power System Static State Estimation" - IEEE Trans. app. and Syst. pp.2718 - 2725, 1971.
2. F.C. Schweppe et al. - "Static State Estimation in Electric Power Systems" Proceeding of the IEEE, July 1974.
3. Felix wu, A. Monticelli - "A Hybrid State Estimator" - IEEE Trans. app. and Syst. December 1985.
4. Debs - "Modern Power System Operation & Control" - Book, 1988.
5. A. Garcia et al. - "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing" IEEE Trans. app. and Syst. - Sepoct. 1979
6. Trends and Progress in System Indentification - Ifac Series, 1981.
7. A. Simoes - Costa, V.H. Quintana - "A Robust Numerical Technique for Power System State Estimation" - IEEE Trans. App. and Syst., February 1981.
8. R.P. Tewarson - "Sparse Matrices", Book - Academic Press - 1973.
9. A. Simoes - Costa, V.H. Quintana - "An Orthogonal Row Processing Algorithm For Power System Sequential State Estimation" - IEEE Trans. app. and Syst., August 1981.
10. J.W. Wang, V.H. Quintana - "A Decoupled Row Processing Algorithm for Power System State Estimation".- August 1984, IEEE Trans. app. and Syst.
11. F.C. Schweppe- "Uncertain Dynamical Systems", Book - 1973.
12. P.R. Kumar, Pravin Varaiya- "Stochastic Systems", Book-1985.
13. Anders Gjelsvik et al.- "Hachtel's Augmented Matrix Method"- IEEE Trans. app. and Syst.- November 1985.
14. Felix wu, Hars Holten et al.- "Comp ri son of Different Methods for State Estimation"-IEEE Trans. on Power Systems-November 1988.
15. Felix wu, Hars Holten, et al.- "Observability Analysis and Bad Data Processing for State Estimation..- IEEE Trans. on Power Systems - May 1988.
16. N.G. Bretas- "Iterative Dynamic State Estimation and Bad Data Processing"- International Journal of Electrical Power and Energy Systems, January 1989.