


7.11.2009

**בקרית מערכות הספק  
באמצעות FACTS**

**Flexible AC Transmission Systems**

**איל רוטמן**



**מערכות הספק** הן מערכות מרמה ארצית עד רמה מקומית המחוללות חשמל ומספקות אותו. גנראטור המפיק חשמל ממקור אנרגיה פחמי או הידרואלקטרי, רשתות תפוצת ההספק, אמצעי המרתו ובקרתו והצרכן הסופי כולם מרכיבים במערכת הספק.

מערכת ההספק ומימדיה מייצרת דינאמיקת עבודה מורכבת. בקרת המערכת מתבצעת כיום באמצעות **FACTS - התקנים מבוססי אלקטרוניקת הספק**. ועל כך במצגת לפנינו.

# היסטוריה

- **טרומ FACTS** – בקרת מערכת ההספק באמצעים מכאניים ולכן איטית. כגון בקרת קיטור בטורבינה, שינוי יחס ליפופים בשנאי, מיתוג זרמים.
- **FACTS – (שלהי שנות ה-80)** – שימוש ברכיבים מבוססי טיריסטורים לשליטה על זרימת ההספק במערכת ההספק. שיפור מהירות בקרה ומזעור תקלות.
- **FACTS – (1999)** - רשתות AC הכוללות בקרים סטאטיים או מבוקרי אלקטרוניקת הספק בכדי להגביר את יכולת הבקרה ולהגביר את יכולת העברת ההספק.

# מדוע FACTS ?



- שיפור הצריכה מבלי להוסיף קווי תמסורת.
- יציבות המערכת.
- מהירות תגובה לכשלים.
- מזעור תקלות.
- עלות בקרה נמוכה (בעיקר בעתיד).

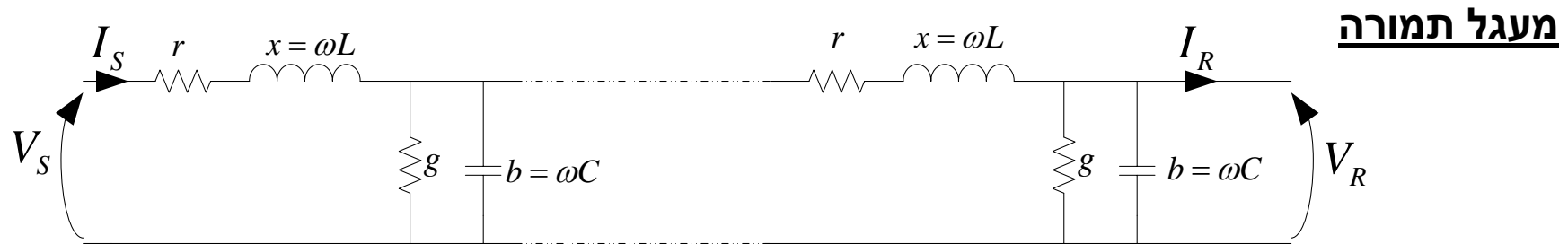


TCSC Serra da Mesa, Brazil

## מבנה המצגת

- .1 הקדמה - קווי תמסורת.
- .2 הקדמה - רכיבי FACTS.
- .3 הקדמה - Swing Equation עבור גנראטור בודד ועבור גנראטור  $i$  מתוך  $n$ .
- .4 מודל בקר ה-UPFC.
- .5 יצוג מערכת ע"י מטריצת אדמיטנסים וצמצום צמתים.
- .6 שילוב מודל ה-UPFC במערכת ההספק.
- .7 חוג הבקרה.
- .8 הצגת תוצאות מעשיות.

# קו תמסורת כללי



## משמעות פרמטרים

$r$  – התנגדות טורית ליחידת אורך. מייצג אובדן אנרגיה בקו  $\Omega / km$ .

$g$  – מוליכות מקבילית (shunt) ליחידת אורך. הפסדי קורונות וזליגות  $S / km$ .

$L$  – השראות ליחידת אורך.  $H / km$ .

$C$  – קיבול ליחידת אורך  $F / km$ . עקב הפרשי פוטנציאלים בין המוליכים. הקיבול נטען ונפרק, זרמים אלו תורמים להפסדים.

$l$  – אורך הקו.

# משוואות תיאור ומודל קו כללי

צד המחולל:  $V_S, I_S$  , צד העומס:  $V_R, I_R$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_C \sinh(\gamma l) \\ \sinh(\gamma l) / Z_C & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

**משוואות קו תמסורת כללי:**

$$Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad z = r + jx = r + j\omega L$$

$$y = g + jb = g + j\omega C$$

$$\gamma = \sqrt{zy}$$

**פרמטרים**

**קבוע ההתקדמות**  $\gamma = \alpha + j\beta$  כאשר  $\alpha$  הוא קבוע הניחות ו- $\beta$  היא תדר מרחבי.

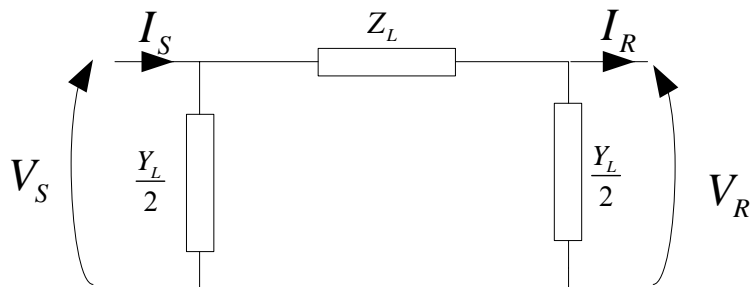
**מודל  $\pi$  - קו תמסורת כללי**

הפרמטרים הינם:

$$Z_L = Z \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l}, \quad Y_L = Y \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2}$$

$Z = zl$  האימפדנס הכולל של הקו,

$Y = yl$  האדמיטנס הכולל של הקו.



# מודל קו תמסורת ארוך חסר הפסדים

קו חסר הפסדים -  $g$  זניח,  $r \ll x$  ולכן קבוע הניחות מתאפס.

$$V_S = V_R \cos(\beta l) + jZ_C I_R \sin(\beta l)$$

משוואות הקו הארוך

$$I_S = I_R \cos(\beta l) + j \frac{V_R}{Z_C} \sin(\beta l)$$

האימפנס האופייני מקבל ערך ממשי  $Z_C = \sqrt{zy} = \sqrt{\frac{L}{C}}$

קבוע ההתקדמות מקבל את הערך  $\gamma = \sqrt{zy} = j\omega\sqrt{LC}$

העמסת הקו בעומס טבעי ( $Z_C$  Surge Impedance Load - SIL)

$$V_S = |V_R| e^{j\beta l}, I_S = |I_R| e^{j\beta l} \quad \text{תוצאות:}$$

□ אמפליטודת הזרם והמתח שומרות על ערכן לאורך הקו.

□ הזרם והמתח נמצאים באותה הפאזה לאורך הקו לכן ההספק הממשי הממוצע נותר זהה וההספק הראקטיבי הינו אפס.

# הספקים בקו תמסורת חסר הפסדים

הספק אקטיבי □

$$P_R \cong \frac{V_S V_R}{X} \sin \delta_{SR}$$

$$Z_C \sin(\beta l) \cong \sqrt{\frac{L}{C}} \omega \sqrt{LC} l = \omega L l = X$$

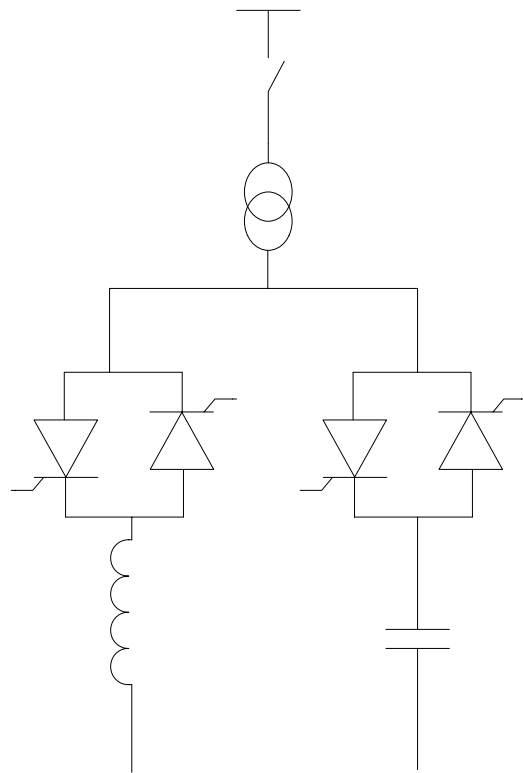
הספק ראקטיבי □

$$Q_R \cong \frac{V_{Rm}}{X} (V_{Sm} \cos \delta_{SR} - V_{Rm})$$

$$Q_S \cong \frac{V_S}{X} (V_{Sm} - V_{Rm} \cos \delta_{SR})$$

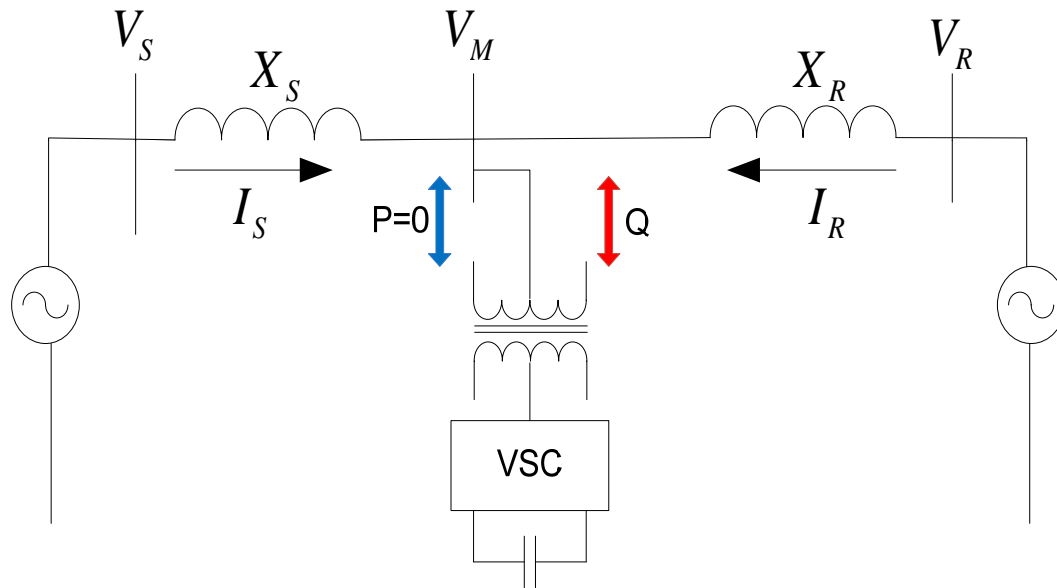
# דוגמא לרכיב FACTS מבוסס טיריסטורים

## Static VAR Compensator – SVC



- מטרה** - וויסות הספק ראקטיבי לצורכי המערכת ההספק.
- הרכיב מווסת את ההספק הראקטיבי גם בתחום הקיבולי וגם בתחום ההשראותי
- עומס המערכת קיבולי** (מוביל) ה- SVC ישתמש בסליל לספוג את ה- VARs מהמערכת
- עומס המערכת השראי** (מפגר) ה- SVC ישתמש בקבלים לספק את ה- VARs הדרושים

# STATCOM



Static Compensator □

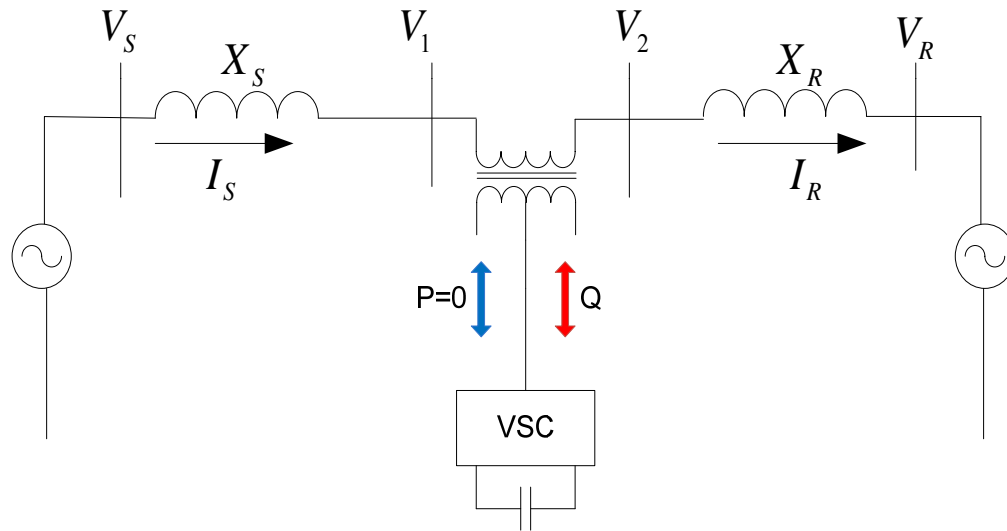
□ מחובר ב- shunt לקו התמסורת.

□ מחליף הספק אקטיבי בלבד עם הרשת, כיוון שאין מסלול מעבר להספק ממשי.

□ מקור האנרגיה של הבקרה הוא קבל מתח ה-DC בכניסה ל-VSC (ממיר מתח DC ל-AC של הרשת).

# SSSC

Static Synchronous Series Compensator

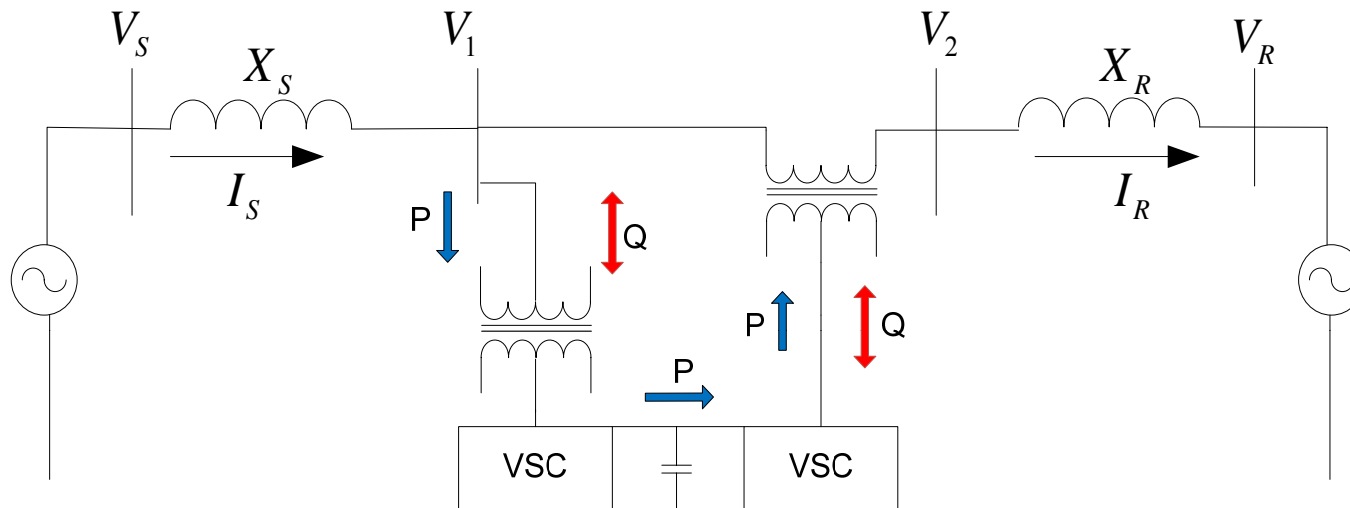


מחובר בטור לקו התמסורת.

מחליף הספק אקטיבי בלבד עם הרשת, כיוון שאין מסלול מעבר להספק ממשי.

מקור האנרגיה של הבקרה הוא קבל מתח ה-DC בכניסה ל-VSC (ממיר מתח DC ל-AC של הרשת).

# UPFC



Unified Power Flow Controller

בקר המשלב את שני הבקרים הקודמים STATCOM, SSSC

ישנו מעבר לתחלופת הספק אקטיבי עם הרשת עקב המסלול בין הממירים, לכן מחליף הספק ראקטיבי ואקטיבי עם מערכת ההספק.

# Swing Equation של גנראטור בודד

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega$$

משוואות

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_D = P_{acc}$$

פרמטרים

- $M$  – קבוע אינרציה
- $P_D$  – הספק ריסון והפסדים
- $\delta = \frac{\delta_m}{p/2}$  – זווית חשמלית
- $\Delta\omega = \omega - \omega_s$  – הפרש מהירויות סיבוב חשמליות  
 $\omega_s = \frac{\omega_{sm}}{p/2}, \omega = \frac{\omega_m}{p/2}$
- $P_{acc}$  – הספק ההאצה (תאוטה)
- $P_e$  – הספק חשמלי
- $P_m$  – הספק מכאני

# מודל דינאמי של גנראטור i במערכת n גנראטורים

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \Delta\omega_i$$

$$M_i \frac{d^2\theta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA}$$

משוואות הדינאמיקה

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n (C_{ij} \sin \theta_{ij} + D_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - D_{ii}) - 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n D_{kj} \cos \theta_{kj}$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$$

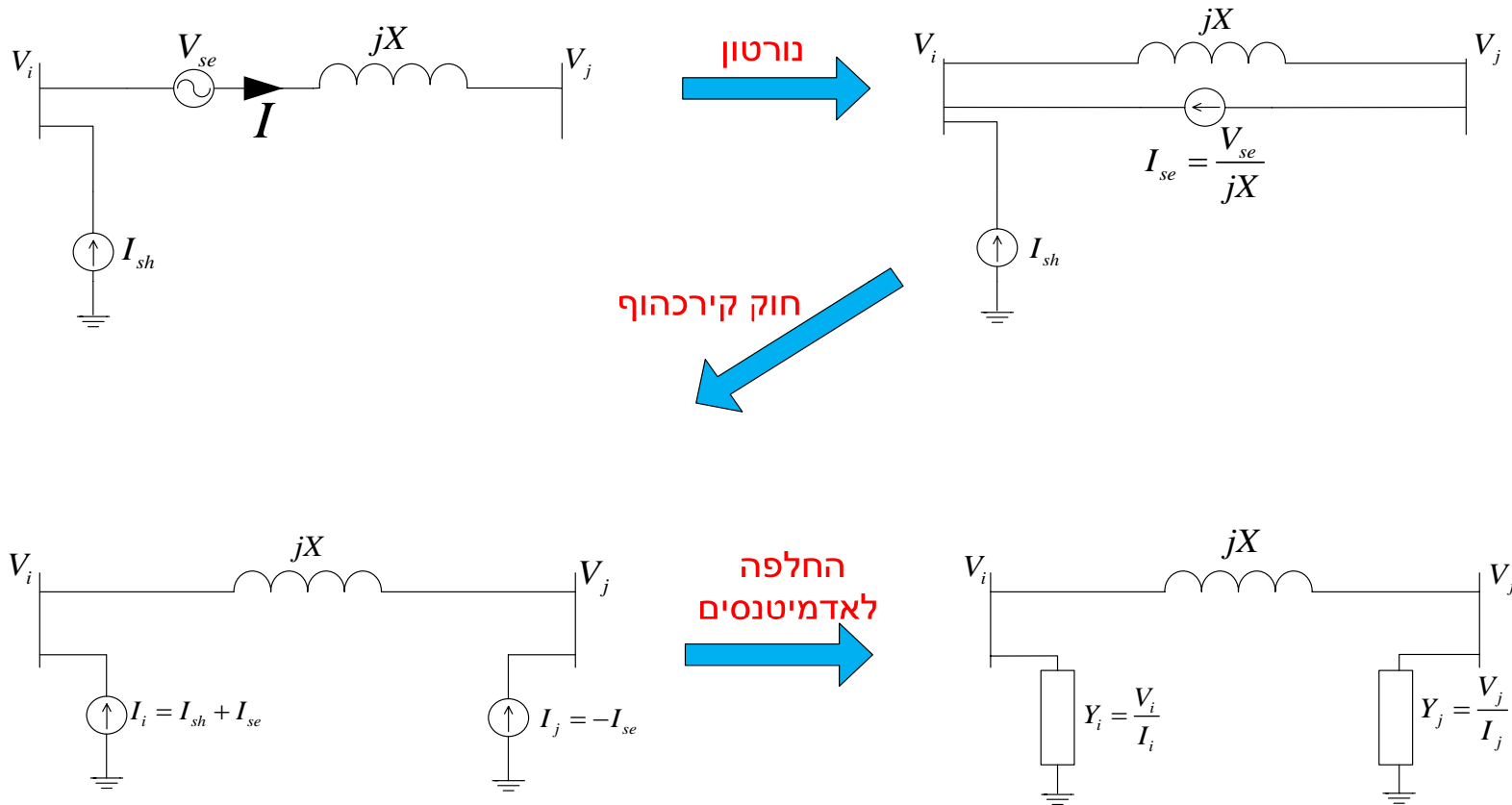
$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j, C_{ij} = E_i' E_j' B_{ij}, D_{ij} = E_i' E_j' G_{ij}$$

$$\bar{Y}_{red} = (G + jB)$$

$E_i'$  - המתח הפנימי של הגנראטור ה-i.

פרמטרים

# מודל $\pi$ של UPFC וקו התמסורת



$$Y_i = \frac{V_i}{I_{sh} + \frac{V_{se}}{jX}}, Y_j = -jX \frac{V_j}{V_{se}} : \text{אדמיטנסים משתנים בזמן הינם: } \square$$

## מסלול הספק אקטיבי בבקרה

הבקור מבצע תחלופת הספקים אקטיבי וראקטיבי עם מערכת ההספק. הבקור אינו מקור הספק אקטיבי, מה שמוזן לרשת על ידו גם נצרך חזרה.

ההספק האקטיבי במסלול הבקרה הוא ההספק הנצרך ע"י מקור המתח

$$P_{se} = \text{Re}(V_{se} I^*), \quad I = \frac{V_i - V_j - V_{se}}{jX} \quad : V_{se} \text{ הטורי של הבקור}$$

## זרמי הבקור

ניתן לחלק את מקור הזרם של הבקרה  $I_{sh}$  לשני זרמים  $I_{shr}, I_{shq}$ .  $I_{shr}$  מזין את ההספק האקטיבי למסלול הבקרה ו  $I_{shq}$  מחליף הספק ראקטיבי עם הרשת.

$$\begin{aligned} I_{sh} &= I_{shr} + I_{shq} = |I_{shr}| e^{j\delta_i} + |I_{shq}| e^{j(\delta_i \pm \pi/2)} \\ &= (|I_{shr}| \pm j |I_{shq}|) e^{j\delta_i} \end{aligned}$$

$$I_{shr} = \frac{P_{se}}{|V_i|} e^{j\delta_i}$$

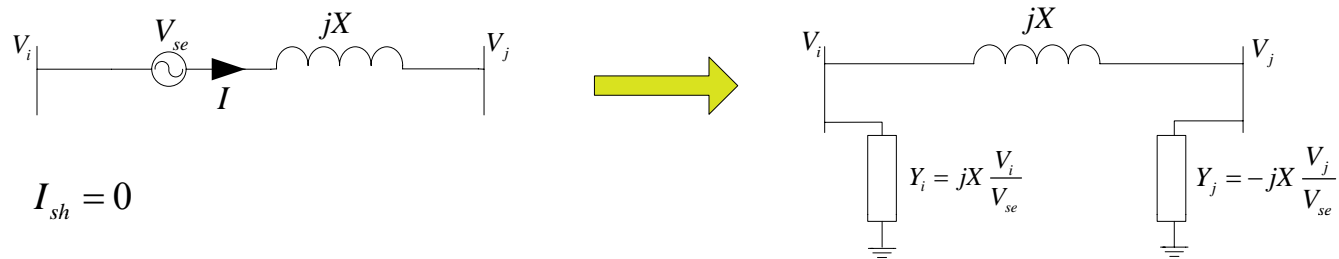
זרם הספק ממשי:

זרם הספק ראקטיבי:

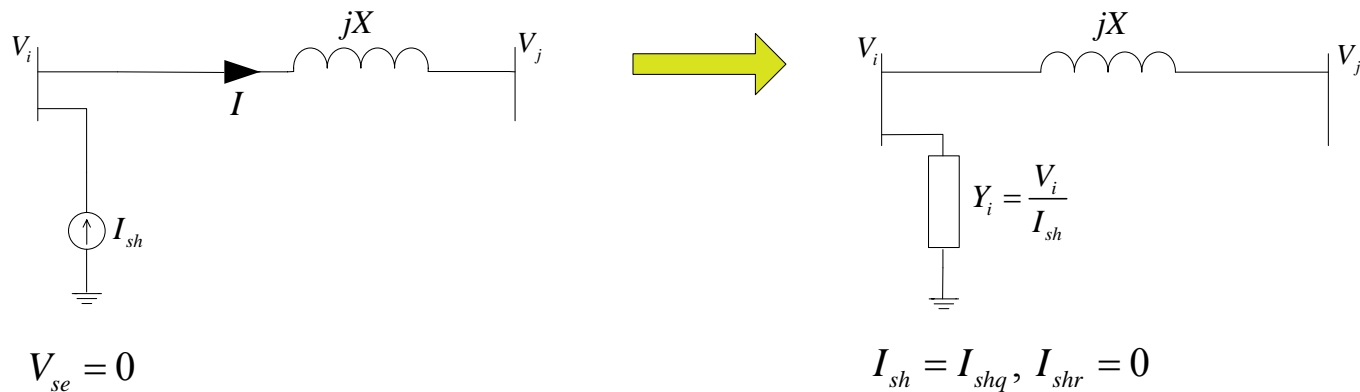
$$I_{shq} = \sqrt{|I_{sh}|^2 - |I_{shr}|^2} e^{j(\delta_i \pm \pi/2)}$$

# מודלי STATCOM, SSSC מתוך מודל UPFC

□ SSSC - מודל ה-UPFC כאשר זרם ה-shunt מאופס.

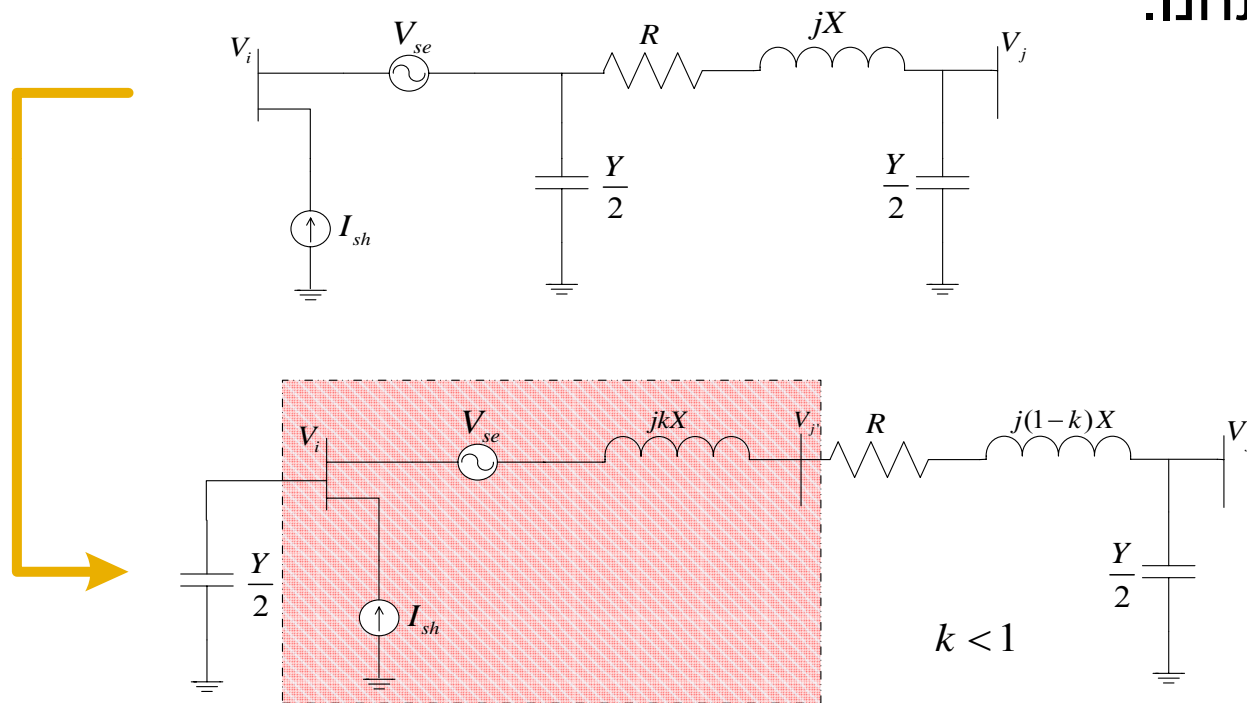


□ STATCOM - מודל ה-UPFC כאשר המתח הטורי מאופס.



# התנגדות וקיבול הקו במודל ה-UPFC

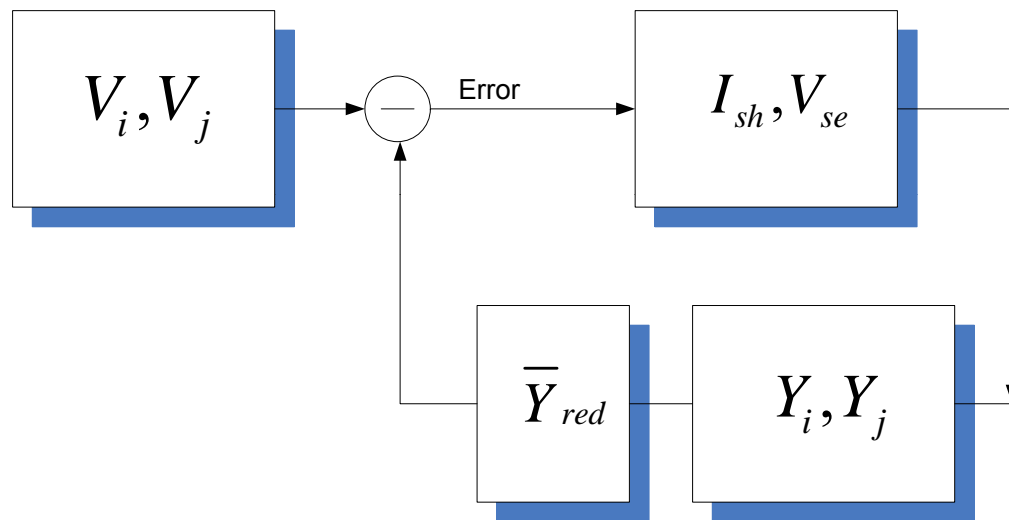
- מטרה - עליה בדיוק תוצאות מושל ההתנהגות הדינאמית ע"י הכנסת התנגדות וקיבול לקווי התמסורת, תוך שמירה על מודל ה-שפיתחנו.



- האזור המסומן מוחלף למודל ה- $\pi$  שפותח, בעוד שאר הרכיבים מוכללים במערכת ההספק במטריצת האימפדנסים.

# עקרון פעולת בקר ה-UPFC

## סכימת בלוקים - המחשת העקרון

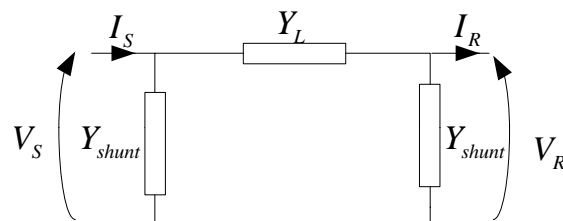


## הסבר

מתחי בסיס  $i, j$ , נדגמים ממערכת ההספק, מושווים לרפרנס רצוי, והשגיאה גורמת לבקר לייצר מתח טורי וזרם שאנט הקובעים את  $Y_i, Y_j$  במודל האדמיטנסים מוכנסים כחלק ממטריצת האדמיטנסים המצומצמת של המערכת ובכך מווסתים את  $V_i, V_j$  למתחים הרצויים.

# Nodal Network Equation

- רשת החשמל (מערכת ההספק) מורכבת מקווי תמסורת מקשרים רבים ומשנאים, כל אחד מיוצג ע"י מעגל  $\pi$  אקוויוולנטי:



- מודלים אלו משולבים יחדיו ליצירת משוואה של כלל הצמתים באמצעות מטריצת אדמיטנסים:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1N} \\ \vdots & \cdot & \vdots & \cdot & \vdots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{iN} \\ \vdots & \cdot & \vdots & \cdot & \vdots \\ Y_{N1} & \dots & Y_{Ni} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \Rightarrow \bar{I} = \bar{Y}\bar{V}$$

# מטריצת אדמיטנסים

□  $i, j$  מייצגים שמות צמתים,  $V_i, I_i$  מייצגים את הזרם המוזרק לצומת  $i$  והמתח שלה בהתאמה.  $Y_{ij}$  הוא האדמיטנס ההדדי בין צמתים  $i, j$ .

□ **אדמיטנס עצמי**  $Y_{ii} = \sum_{j=1}^N Y_{ij}, j \neq i$  הוא סכום כל האדמיטנסים המקושרים לצומת  $i$  כולל כל אדמיטנסי ה-shunt.

□ מתקיים כי סכום האלמנטים בכל שורה שווה ל**אדמיטנס ה-shunt** השקול המחבר את צומת  $i$  לאדמה:  $Y_{i0} = \sum_{j=1}^N Y_{ij}$ .

□ כל רשת תמסורת מיוצגת ע"י **מטריצת אדמיטנסים יחידה**.

□ **מטריצת האדמיטנסים סינגולארית** ולכן הופכית רק אם אין באף צומת אדמיטנסי shunt, ז"א סכום כל שורה שווה לאפס. זו הצורה המצומצמת ביותר של המטריצה. (צורה מצומצמת מוסברת בהמשך)

# זרמים והספקים ע"פ מטריצת אדמיטנסים

## הזרם המוזרק לצומת □

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{j=1; j \neq i}^N V_j Y_{ij} e^{-j(\delta_j + \theta_{ij})}$$

## הגדרת מתחים ואדמיטנס הדדי □

$$V_i = |V_i| e^{j\delta_i}, Y_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\theta_{ij}}$$

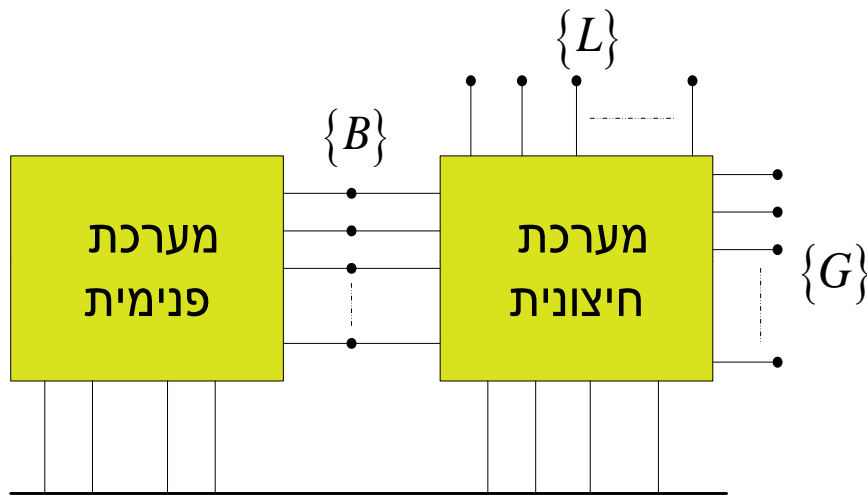
## הספקים □

$$\begin{aligned} S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* &= |V_i| e^{j\delta_i} \left[ |Y_{ii}| |V_i| e^{-j(\delta_i + \theta_{ii})} + \sum_{j=1; j \neq i}^N |V_j| |Y_{ij}| e^{-j(\delta_j + \theta_{ij})} \right] \\ &= |V_i|^2 |Y_{ii}| e^{-j\theta_{ii}} + |V_i| \sum_{j=1; j \neq i}^N |V_j| |Y_{ij}| e^{j(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})} \end{aligned}$$

$$P = |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j=1; j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

$$Q = -|V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j=1; j \neq i}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

# ניתוח מערכת הספק גדולה



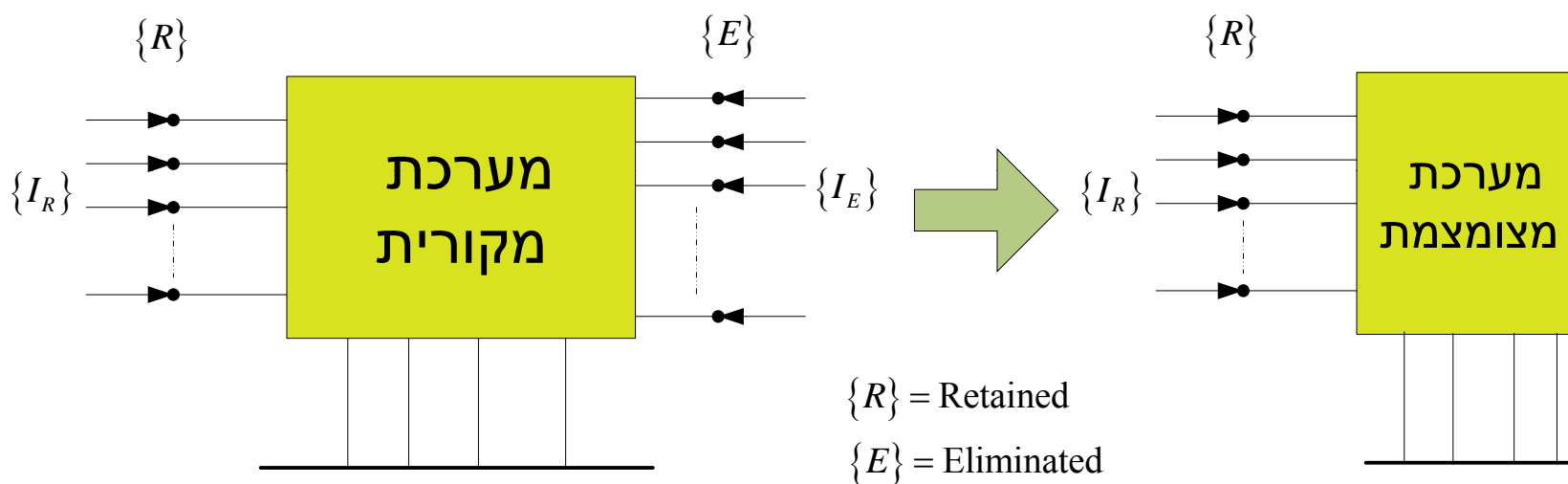
- $\{B\}$  צמתי גבול
- $\{L\}$  צמתי עומס
- $\{G\}$  הזנות גנראטורים של מערכת חיצונית

ניתוח מערכת הספק איננו עוסק במערכת המפורטת כולה. אין צורך וגם אין יכולת לנתח את המערכת בשלמותה.

החלק המנותח (בד"כ החלק בו קורה הכשל) קרוי מערכת פנימית והחלק אשר לו מוצאים מערכת אקוויוולנטית קרוי מערכת חיצונית.

מציאת מערכת אקוויוולנטית מתבטאת בכך שהמערכת הפנימית מוחלפת בייצוג אחרת, כך שכלל הזרמים בצמתי הגבול אופסו.

# מציאת מערכת אקוויוולנטית באמצעות צמצום צמתים



□ כאשר אוסף של צמתים  $\{E\}$  מבוטל ממודל מערכת הספק, מחויב כי הזרמים והמתחים של הצמתים הנותרות  $\{R\}$  יהיה ללא שינוי.

# מציאת מערכת מצומצמת

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_R \\ \bar{I}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{RR} & \bar{Y}_{RE} \\ \bar{Y}_{ER} & \bar{Y}_{EE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{V}_E \end{bmatrix}$$

ייצוג מטריציוני של המערכת לפני צמצום

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_R \\ \bar{V}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_R & \bar{K}_I \\ \bar{K}_V & \bar{Y}_{EE}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_E \end{bmatrix}$$

פיתוח משוואות הייצוג

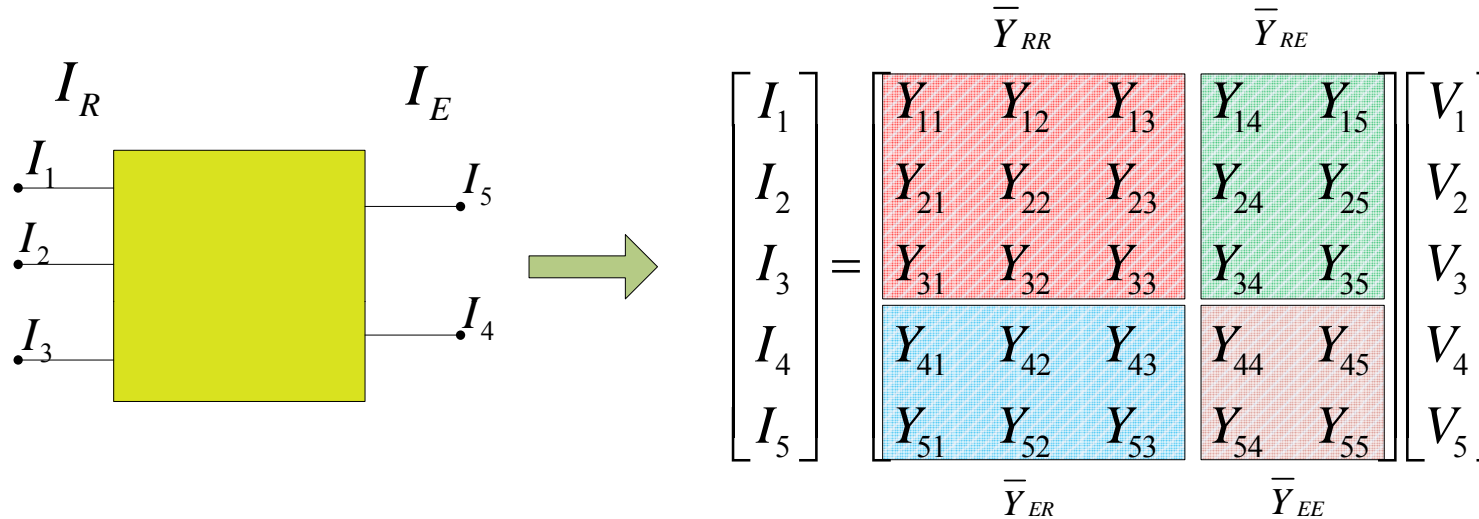
$$\bar{Y}_R = \bar{Y}_{RR} - \bar{Y}_{RE} \bar{Y}_{EE}^{-1} \bar{Y}_{ER}$$

$$\bar{K}_I = \bar{Y}_{RE} \bar{Y}_{EE}^{-1}, \quad \bar{K}_V = -\bar{Y}_{EE}^{-1} \bar{Y}_{ER}$$

$$\bar{I}_R = \bar{Y}_R \bar{V}_R + \Delta \bar{I}_R$$
$$\Delta \bar{I}_R = \bar{K}_I \bar{I}_E$$

ייצוג המערכת המצומצמת

# המחשה מטריצת אדמיטנסים



$$\bar{Y}_{ER} = \bar{Y}_{RE}^T \text{ מתקיים כי}$$

$\bar{Y}_{RR}$  - תמסורת בין צמתי R לבין עצמם.

$\bar{Y}_{EE}$  - תמסורת בין צמתי E לבין עצמם.

$\bar{Y}_{RE}$  - תמסורת בין צמתי R לצמתי E.

$\bar{Y}_{ER}$  - תמסורת בין צמתי E לצמתי R.

# Sparse Matrix Elimination Algorithm

□ טכניקת הצמצום המופעלת היא צמצום צומת בודדת בכל איטרציה על מנת להפחית סיבוכיות וצורכי זיכרון.

□ צמצום צומת בודדת k:

נמצא את מטריצת האדמיטנסים  $\bar{Y}_R$

$$\bar{Y}_R = \left[ \bar{Y}_{RR} \right]_{n \times n} - \left[ \bar{Y}_{RE} \bar{Y}_{EE}^{-1} \bar{Y}_{ER} \right]_{n \times n}$$

$$\bar{Y}_{RE} \bar{Y}_{EE}^{-1} \bar{Y}_{ER} = \frac{1}{Y_{kk}} \begin{bmatrix} Y_{1k} \\ \vdots \\ Y_{ik} \\ \vdots \\ Y_{nk} \end{bmatrix}_{n \times 1} \begin{bmatrix} Y_{k1} & \dots & Y_{kj} & \dots & Y_{kn} \end{bmatrix}_{1 \times n} = \frac{1}{Y_{kk}} \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ Y_{ik} Y_{kj} & \dots & \dots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{n \times n}$$

↑  
סקלר

# Elimination of a single node - Sparse

$$Y_{ij}^{new} = Y_{ij}^{old} - \frac{Y_{ik}Y_{kj}}{Y_{kk}} \quad \text{for } i \neq k, j \neq k$$

□ אלמנט במטריצה  $\bar{Y}_R$ :

$$Y_{ij}^{old} \in \bar{Y}_{RR}$$

$$Y_{ij}^{new} \in \bar{Y}_R$$

□ צומת שכנה - אם צומת  $i$  מחוברת ישירות לצומת  $k$  אזי היא נקראת צומת שכנה ו- $\bar{Y}_{ik} \neq 0$ . האדמיטנס ההדדי של צומת שאינה שכנה ל- $k$  שווה לאפס.

## □ מסקנות

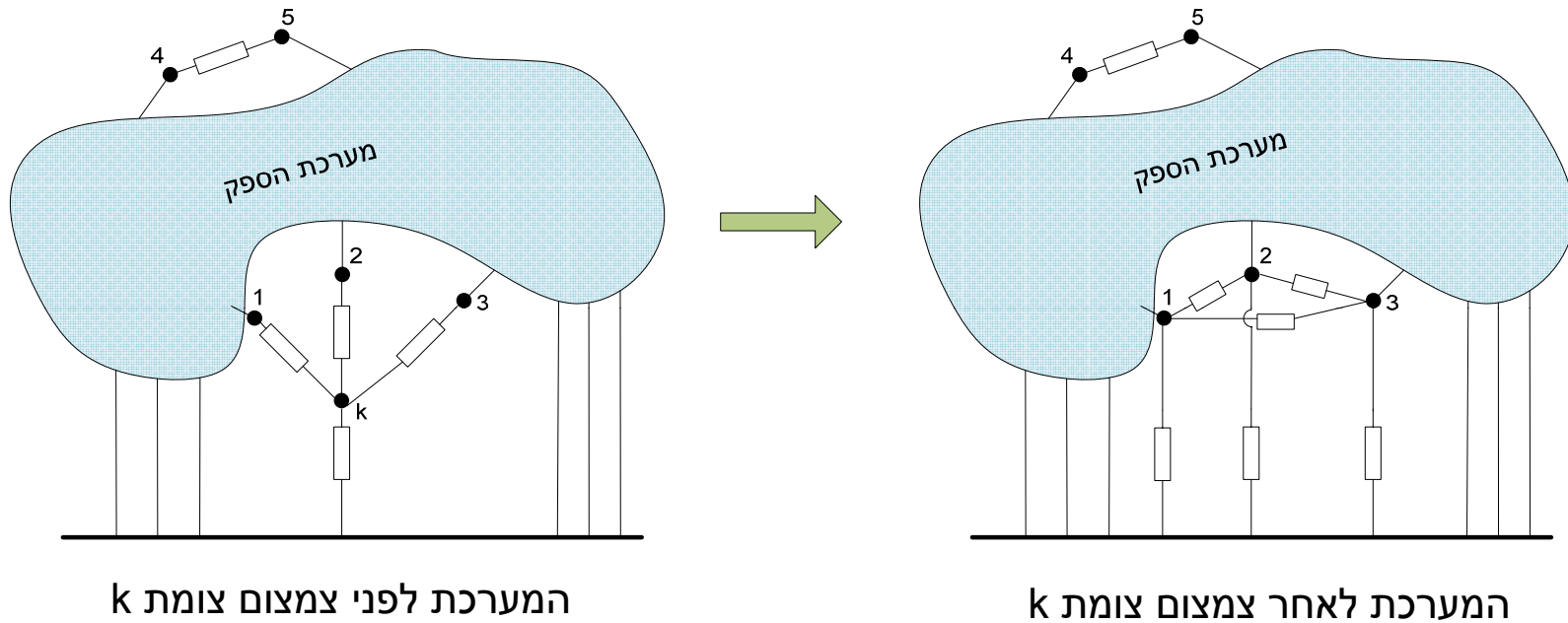
□ אם צמתים  $i$  או  $j$  אינן שכנות של צומת  $k$  האדמיטנס ההדדי  $\bar{Y}_{ij}$  אינו משתנה.

□ צמצום צומת  $k$  משנה את האדמיטנסים בין כל שכניו בכך שנוצרים קשרים בין

צמתים שכנות המחליפים את הקשרים שהיו עם צומת  $k$  עצמה.

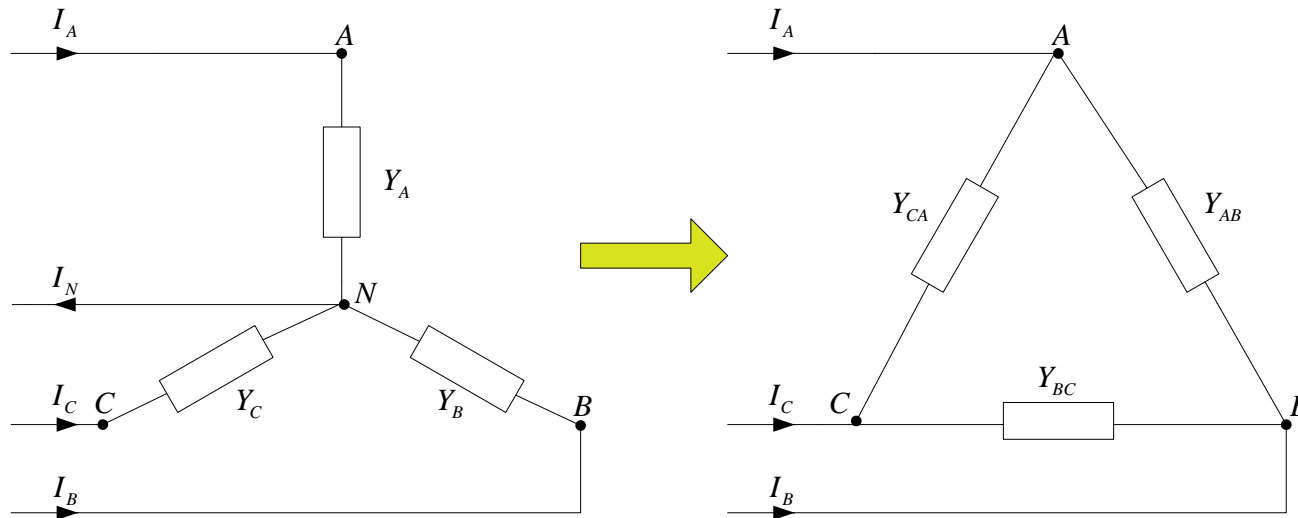
□ האדמיטנסים העצמיים של כל הצמתים השכנות ל- $k$  משתנים.

# Elimination of a single node - Sparse



□ צמתים  $\{1, 2, 3\}$  שכנות לצומת k. ביטול צומת k יוצר חיבורים נוספים בניהן. צמתים  $\{4, 5\}$  אינן שכנות של צומת k ולכן החיבור בניהן אינו משתנה.

# מעבר מחיבור כוכב לחיבור משולש ע"י צמצום צומת הניוטרל (דוגמא)



חיבור כוכב, משולש □

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ -I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{RR} & & \\ & \bar{Y}_{RE} & \\ & & \bar{Y}_{EE} \\ \bar{Y}_{ER} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_N \end{bmatrix}$$

\$Y\_A\$    0    0    \$Y\_A\$    \$-Y\_A\$    \$Y\_A + Y\_B + Y\_C\$  
 0    \$Y\_B\$    0    \$Y\_B\$    \$-Y\_B\$    \$Y\_A + Y\_B + Y\_C\$  
 0    0    \$Y\_C\$    \$Y\_C\$    \$-Y\_C\$    \$Y\_A + Y\_B + Y\_C\$

מטריצת אדמיטנסים □

$$Y_{ij}^{new} = Y_{ij}^{old} - \frac{Y_{ik} Y_{kj}}{Y_{kk}} \quad \text{for } i \neq k, j \neq k$$



$$Y_{AB}^{new} = Y_{AB}^{old} + \frac{Y_A Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C} = 0 + \frac{Y_A Y_B}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$Y_{ij}^{old} \in \bar{Y}_{RR}, Y_{ij}^{new} \in \bar{Y}_R$$

$$Z_{AB}^{new} = Z_A + Z_B + \frac{Z_A Z_B}{Z_C}$$

אימפדנס □  
(נוסחא מוכרת)

# פעולת הבקר ע"י UPFC

□ מטרת הבקרה - שליטה על דינאמיקת הגנראטורים.

(זווית הרוטור)

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i, \frac{d\omega_i}{dt}$$

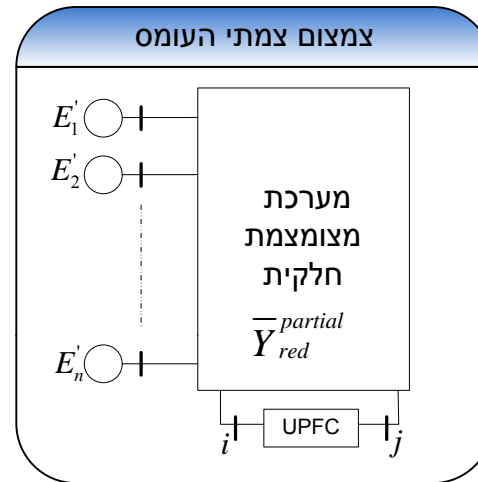
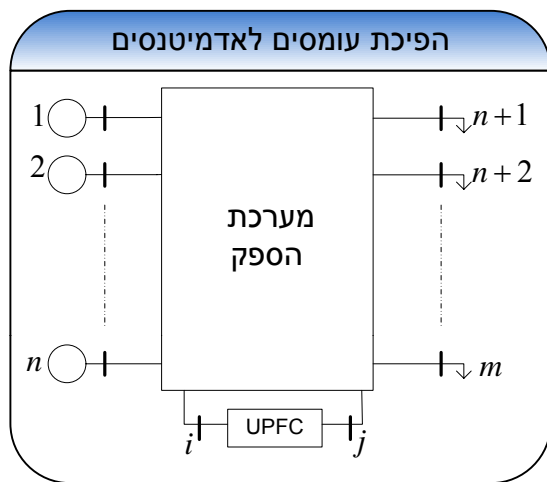
□ שיטת הבקרה - שליטה על משוואות הדינאמיקה

. באמצעות מטריצת האדמיטנסים ( $\bar{I}_g = \bar{Y}_{red} \bar{E}'_g$ )

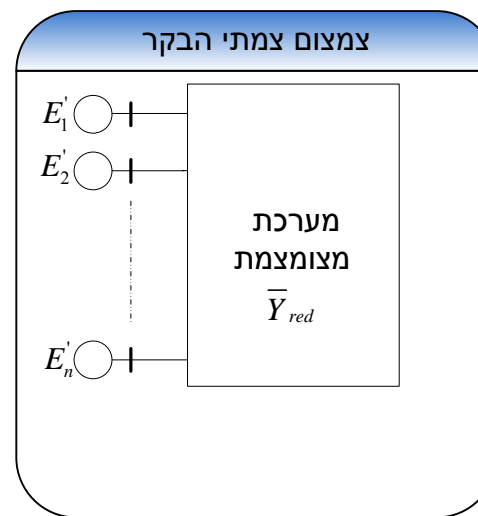
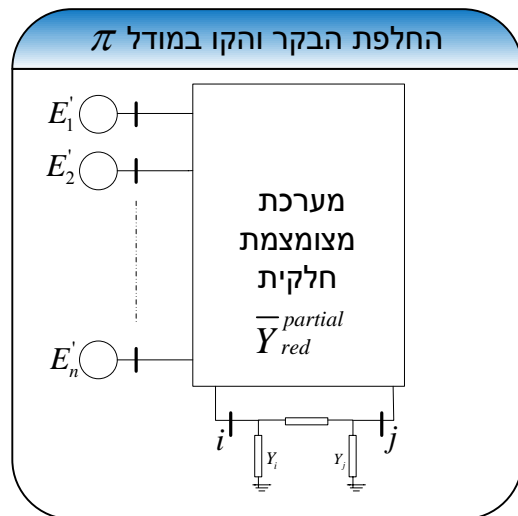
פרמטרי מודל ה-UPFC משולבים במטריצה ובכך

. משנים אותה. פרמטרי המודל נשלטים ע"י  $V_{se}, I_{sh}$

# שילוב בקר ה-UPFC במערכת ההספק



$$\begin{bmatrix} \bar{I}_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{red}^{partial} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_g \\ V_j \\ V_i \end{bmatrix}$$



$$\bar{I}_g = \bar{Y}_{red} \bar{E}_g'$$

# אלגוריתם - קבלת התגובה הדינאמית בנוכחות (UPFC) FACTS

חישוב המודל הדינאמי  $\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i, \frac{d\omega_i}{dt}$    
באמצעות  $\bar{Y}_{red}$ .

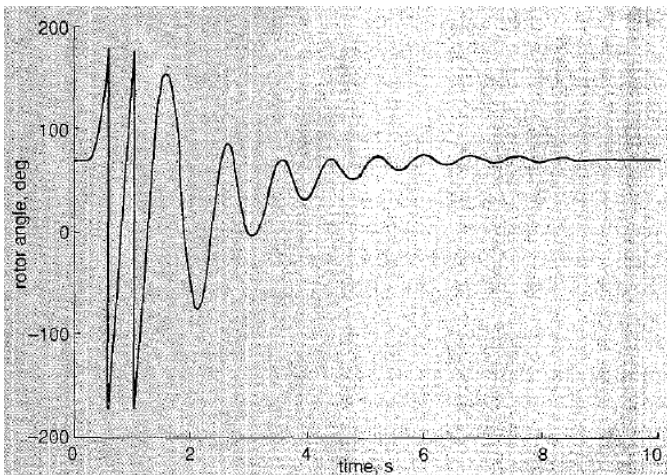
חישוב מתוך  $V_i, V_j$    
 $\bar{Y}_{red}^{partial}$

time changing every  
step integration

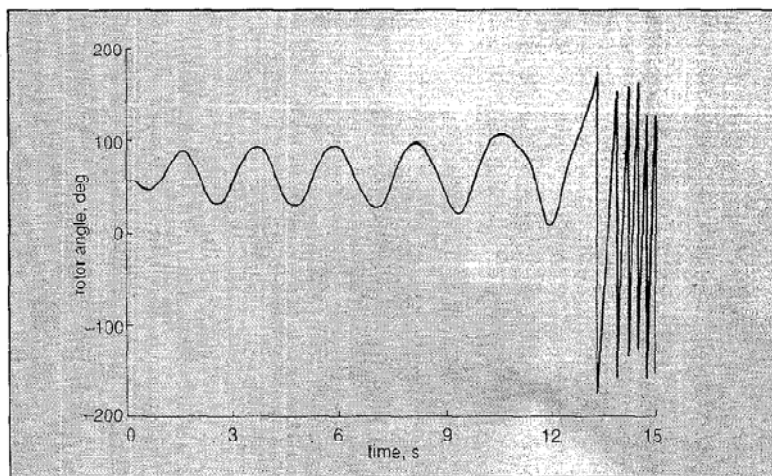
שילוב  $Y_i, Y_j$  ב-  $\bar{Y}_{red}^{partial}$    
וקבלת  $\bar{Y}_{red}$ .

מתן ערך לפרמטרי   
הבקר  $V_{se}, I_{sh}$ .  
וחישוב  $Y_i, Y_j$ .

# הבחנה בין אי יציבויות



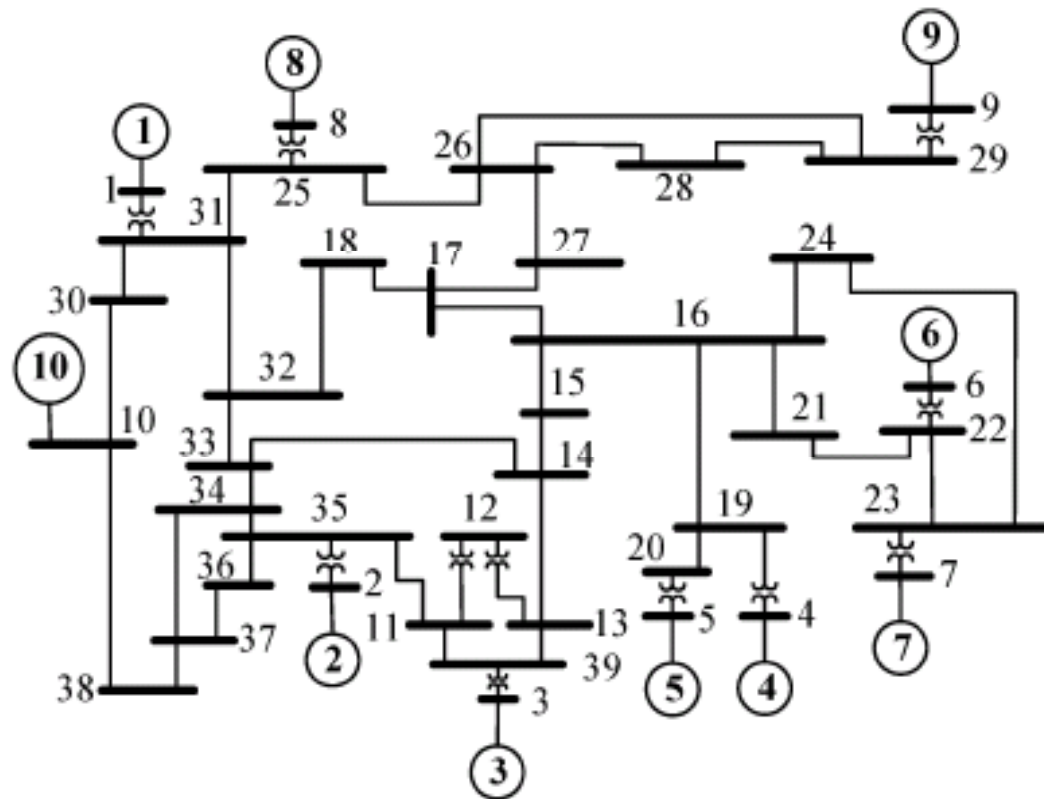
□ **אי יציבות זמנית** - באי יציבות הגנראטור יוצא מיידית מסנכרון, ובמצב סנכרון האוסילציות דועכות לאפס.




□ **אי יציבות דינאמית** - קיים ריסון שלילי במערכת כך שהאוסילציות נבנות ומובילות ליציאת הגנראטור מסנכרון.

# מבחן מעשי למודל הבקרה

- שיטת הבקרה באמצעות FACTS נוסתה על מערכת ההספק הנסיונית של New England. המערכת מונה 10 גנראטורים ו-39 בסיס (צמתים).



- New England test System** - one line diagram



# מבחן מעשי למודל הבקרה

□ **CCT - Critical Clearing Time** - מוגדר כזמן הכשל המקסימאלי שלאחריו המערכת תהיה יציבה.

□ בקרה בעזרת FACTS מעריכה את ה-CCT של מערכת הספק. טיב פעולת הבקרה יבחן עד כמה התארך זמן זה.

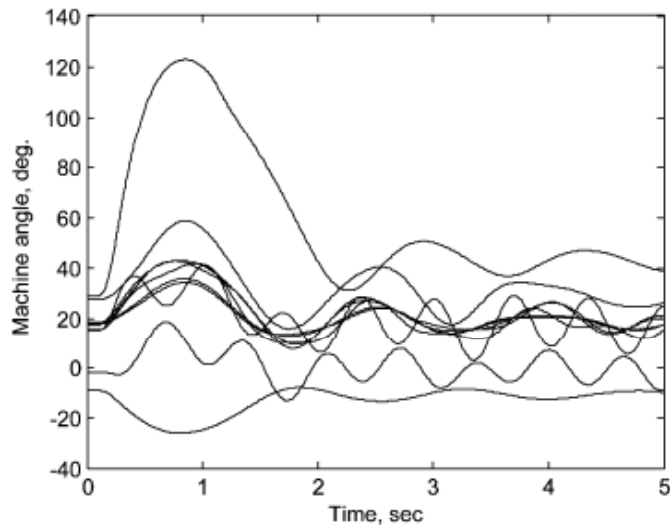
## כשל תלת פאזי סמוך לבס 26

- CCT ללא FACTS הינו 79-80msec.
- לאחר מיקום UPFC בקו 26-28 סמוך לבס 28:

Operation	$V_{se}^{max}$ (pu)	$I_{sh}^{max}$ (pu)	CCT (ms)
SSSC	0.05	-	96-97
	0.075	-	103-104
	0.10	-	109-110
STATCOM	-	1.0	109-110
	-	1.5	120-121
	-	2.0	130-131
UPFC	0.05	1.0	120-121
	0.05	2.0	139-110
	0.10	1.0	130-131
	0.10	2.0	145-146

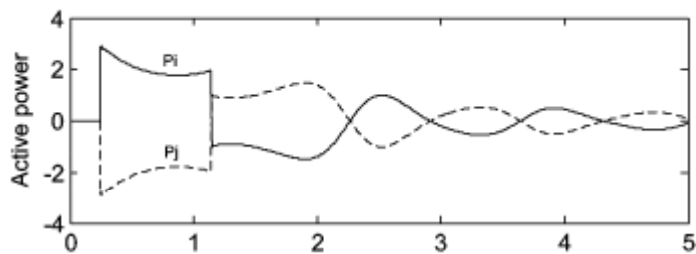
- **מסקנה** - בקר ה-UPFC משיג את ה-CCT הארוך ביותר, 145msec, כיוון שהוא מנצל את יתרונות ה-SSSC וה-STATCOM יחדיו.

# כשל תלת פאזי סמוך לבס 26

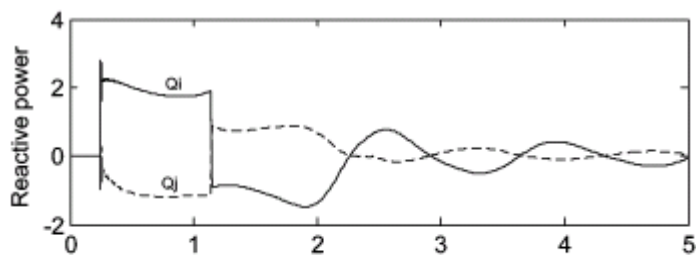


## דינאמיקה של כלל הגנראטורים

במערכת במצב יציב. זמן הכשל הינו 145msec.



הזנת הספקים אקטיבי וראקטיבי ע"י בקר ה-UPFC. ניתן לראות את תחילת הפעולה לאחר 145ms.

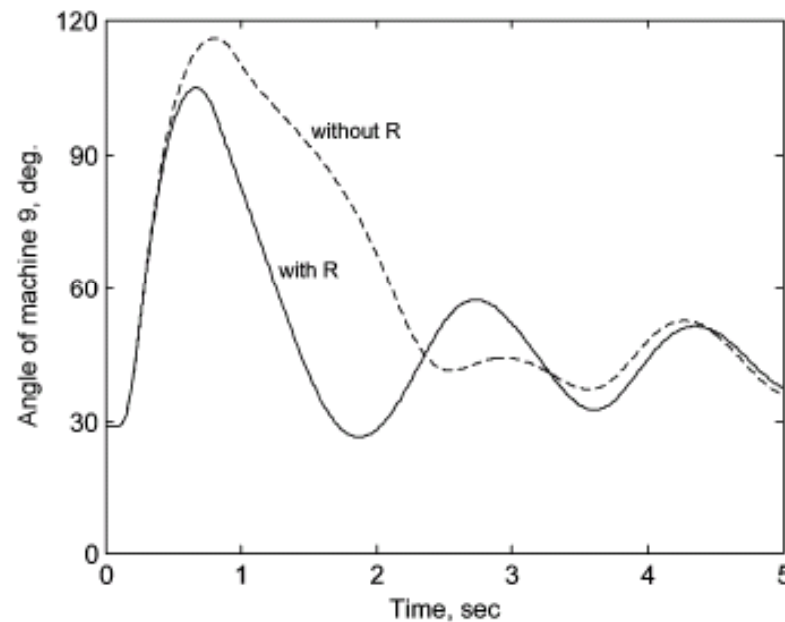


ניתן לראות כי סכום ההספקים האקטיביים של הבקר הם אפס.

# כשל תלת פאזי סמוך לבס 26

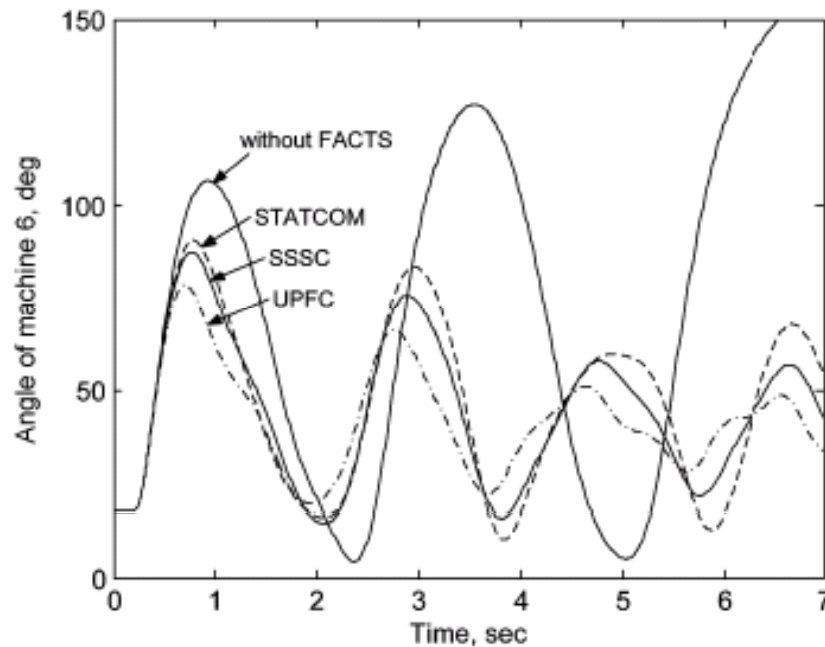
## אפקט ההתנגדות

- להכללת התנגדות הקו במודל שני אפקטים מרכזיים:
- הארכת ה-CCT.
- ריסון מהיר יותר של האוסילציות בחזרת המערכת ליציבות.



## כשל תלת פאזי סמוך לבס 22

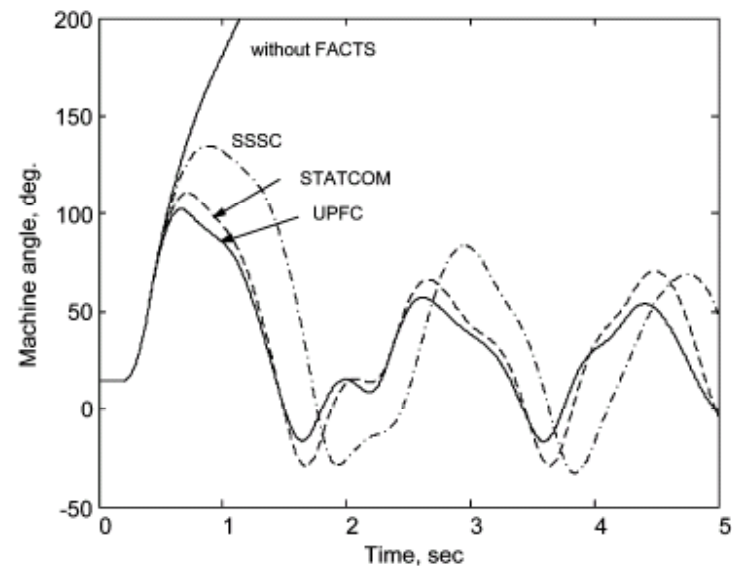
- המערכת נותרת יציבה לאחר זמן של 124ms אך נכנסת לאי יציבות דינאמית (איבוד סנכרון) החל מהאוסילציה השלישית. בקרה בעזרת FACTS מרסנת את התופעה, מגדילה את ה-CCT ושומרת על יציבות.
- התנהגות זמנית של גנראטור 6 במערכת:



# מערכת הספק IEEE

- שיטת הבקרה נוסתה גם על מערכת הבדיקה של ה-IEEE המונה 20 גנראטורים ו-118 בסיים.
- כשל סמוך לבס 25 והכנסת בקר בין בסיים 25-26:

Operation	$V_{se}^{max}$ (pu)	$I_{sh}^{max}$ (pu)	CCT (ms)
SSSC	0.05	-	208-209
	0.075	-	211-212
	0.10	-	213-214
STATCOM	-	1.0	217-218
	-	1.5	223-224
	-	2.0	228-229
UPFC	0.05	1.0	221-222
	0.05	2.0	232-233
	0.10	1.0	225-226
	0.10	2.0	232-233



סיכום תוצאות פעולת הבקרים השונים

התנהגות זמנית של גנראטור 2



## מקורות

- “Evaluation of First Swing Stability of a Large Power System With Various FACTS Devices”  
By M. H. Haque, Senior Member, IEEE.
- Power System Dynamics and Stability.  
By Gan Machowski.
- מתקני חשמל ומערכות הספק.  
נכתב ע"י Eng דימה בודנסקי.