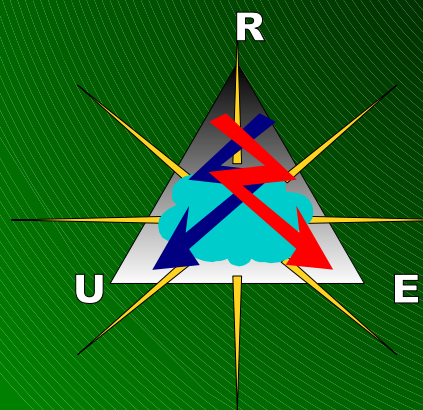


MOC BIERNA A EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA

Przyczynek do rozważań



dr inż. Sławomir Bielecki
Zakład Racjonalnego Użytkowania Energii
ITC PW



Niniejsza praca jest współfinansowana przez **Unię Europejską**
w ramach **Europejskiego Funduszu Społecznego**, poprzez realizację projektu
„Program rozwoju dydaktycznego Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej”



Punkt wyjścia

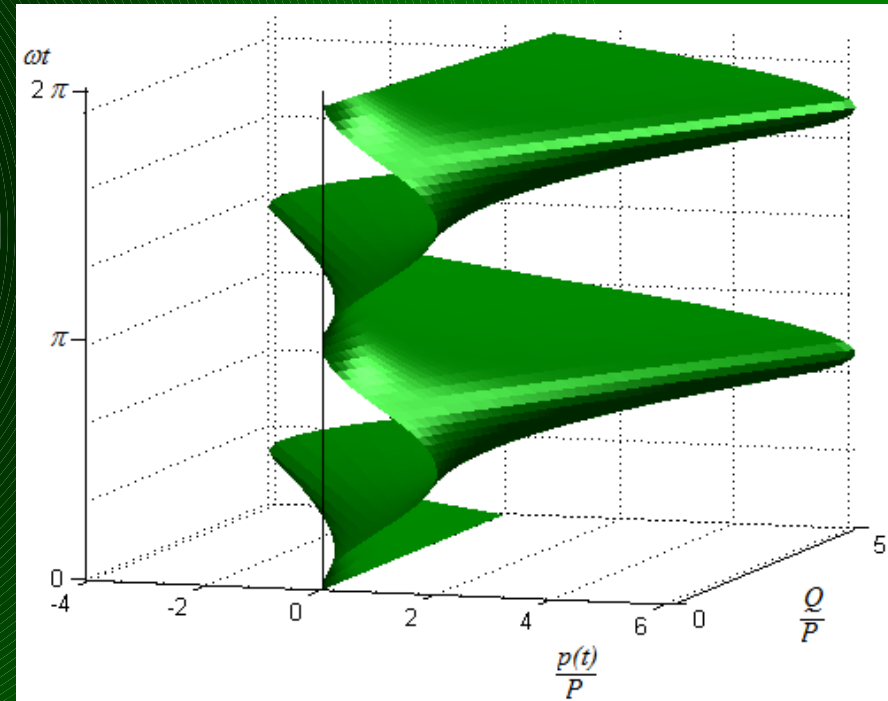
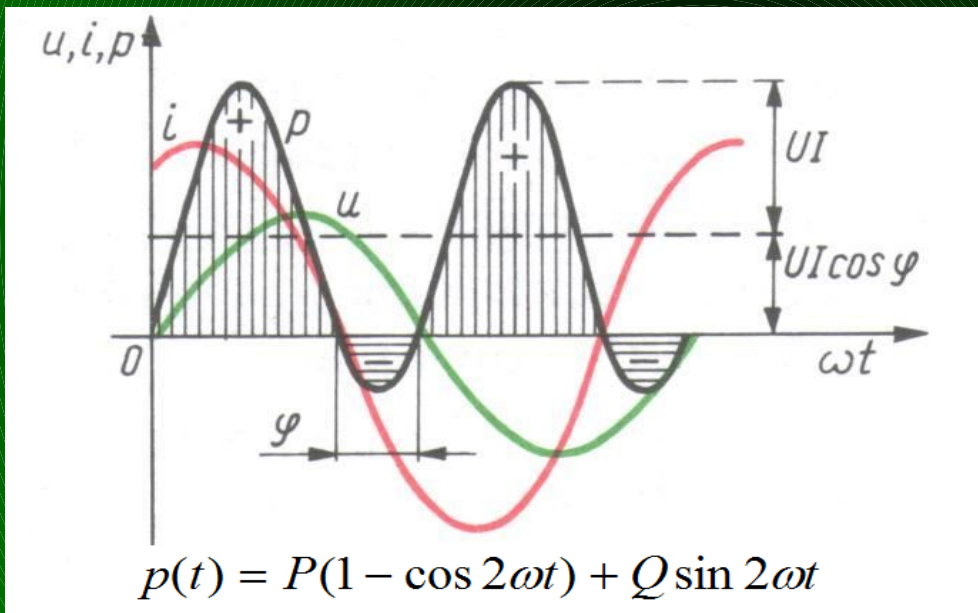
zapis w Ustawie z dnia 15 kwietnia 2011 r. o efektywności energetycznej. Dz.U z 2011r. Nr 94 poz.551 z późn. zm:
ograniczenie przepływów mocy biernej – przedsięwzięciem służącym poprawie efektywności energetycznej
(art.17 ust.1 pkt 5 lit.a)

Pytania:

- Czy zawsze zwiększenie przepływu mocy biernej (Q) powoduje pogorszenie efektywności energetycznej (EE) układu elektrycznego?
 - Czy ograniczanie przepływów mocy biernej jest racjonalne z punktu widzenia SEE?
 - Czy jest potrzebny tak szczegółowy zapis w akcie prawnym wysokiego rzędu (ustawa)?
-
-

Moc bierna

- przypomnienie z elektrotechniki



- immanentna cecha obwodów prądu przemiennego
- energia gromadzona w ciągu $\frac{1}{2}T$ w elementach reaktancyjnych i z powrotem oddawana w ciągu następnego $\frac{1}{2}T$
- w układach 1f – amplituda składowej oscylacyjnej mocy chwilowej
- w układach 3f – brak oscylacji (w układach wielofazowych symetrycznych suma mocy chwilowych wszystkich faz nie jest funkcją czasu)

Moc bierna

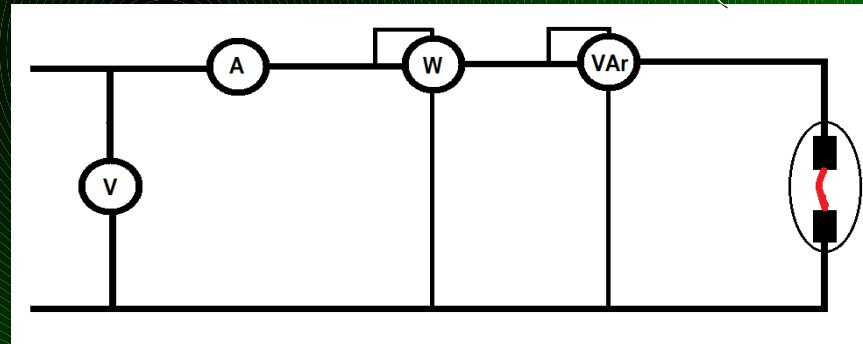
- przypomnienie z elektrotechniki

- **jest potrzebna do wzbudzania zmiennych pól e-m w urządzeniach (maszyny, transformatory...)**
- **od jej przesytu powstają dodatkowe straty (zwiększenie modułu prądu)**
- **sterowanie poziomem poboru/odbioru mocy biernej (pojemnościowej/indukcyjnej) w SEE ma wpływ na poziom napięć w SEE (stabilność i niezawodność pracy)**
- **Q jako wynik korelacji między przesuniętymi w fazie prądem i napięciem nie budzi zastrzeżeń dla układów symetrycznych z przebiegami nieodkształconymi**

Problemy tematyki „Q a EE”

1. Definicja mocy biernej

Doświadczenie Ch.P.Steinmetza (1865-1923)



- Teoria *Budeanu*
- Teoria *Fryzego*
- Teoria *Shepherda – Zakikhaniego*
- Teoria *Depenbrocka*
- Teoria *Kustersa – Moore'a*
- Teoria *Chwilowej Mocy Biernej p-q (IRP p-q)*
- Teoria *Składowych Fizycznych Prądu (CPC)*
- *Zachowawcza Teoria Mocy (CPT)*
- Koncepcja *Skopca - Steca*

METATEORIA MOCY

Problemy tematyki „Q a EE”

2. Problem sprawiedliwych rozliczeń za pobór mocy biernej

$$O_b = k \cdot C_{rk} \cdot \left(\sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_0}} - 1 \right) \cdot A$$

symbole oznaczają:

C_{rk} – cenę energii elektrycznej,

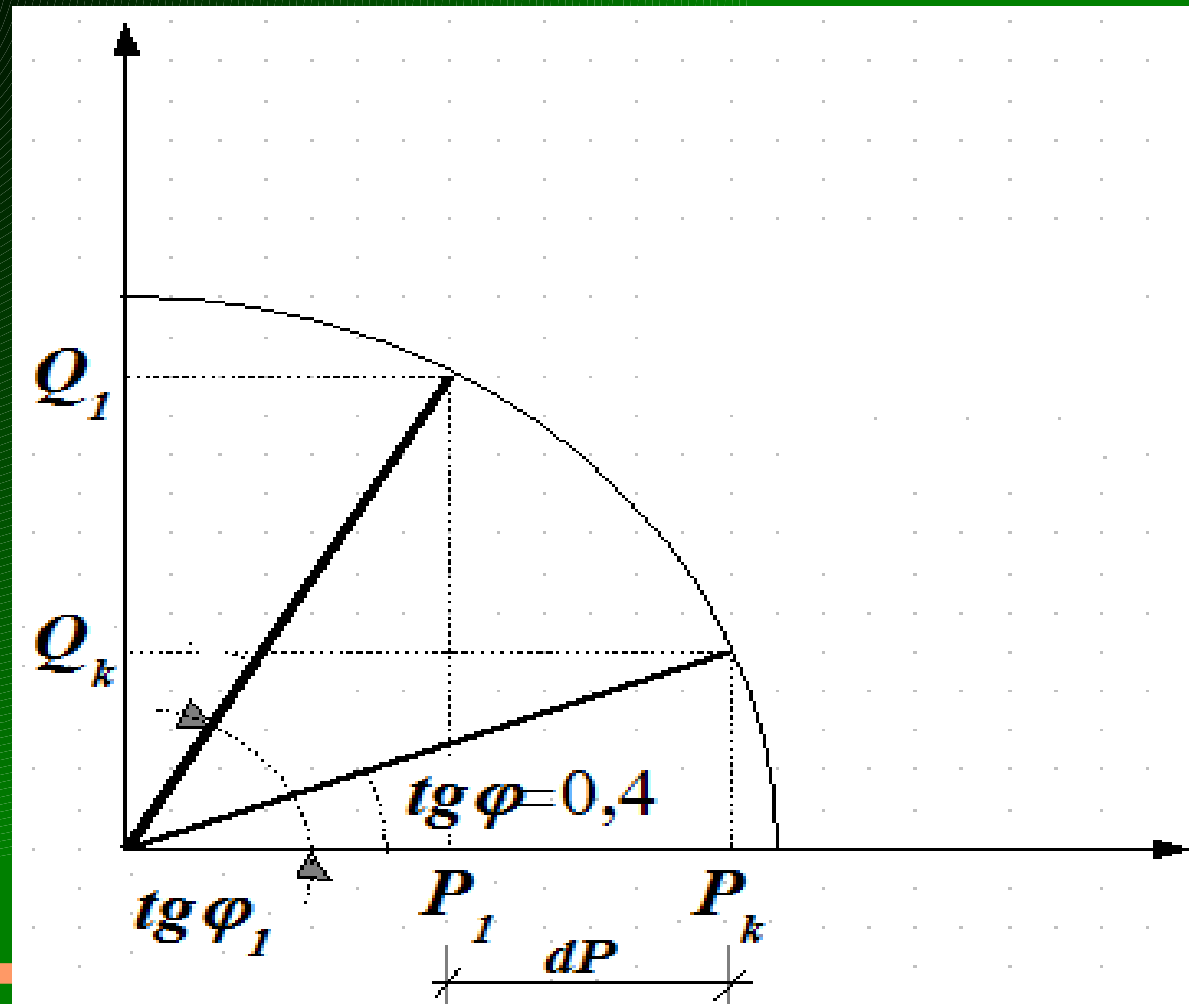
k – ustaloną w taryfie krotność ceny C_{rk} :

- dla sieci WN $k = 0,5$,
- dla sieci SN $k = 1,0$,
- dla sieci nn $k = 3,0$,

$\operatorname{tg} \varphi_0$ – umowny współczynnik mocy,

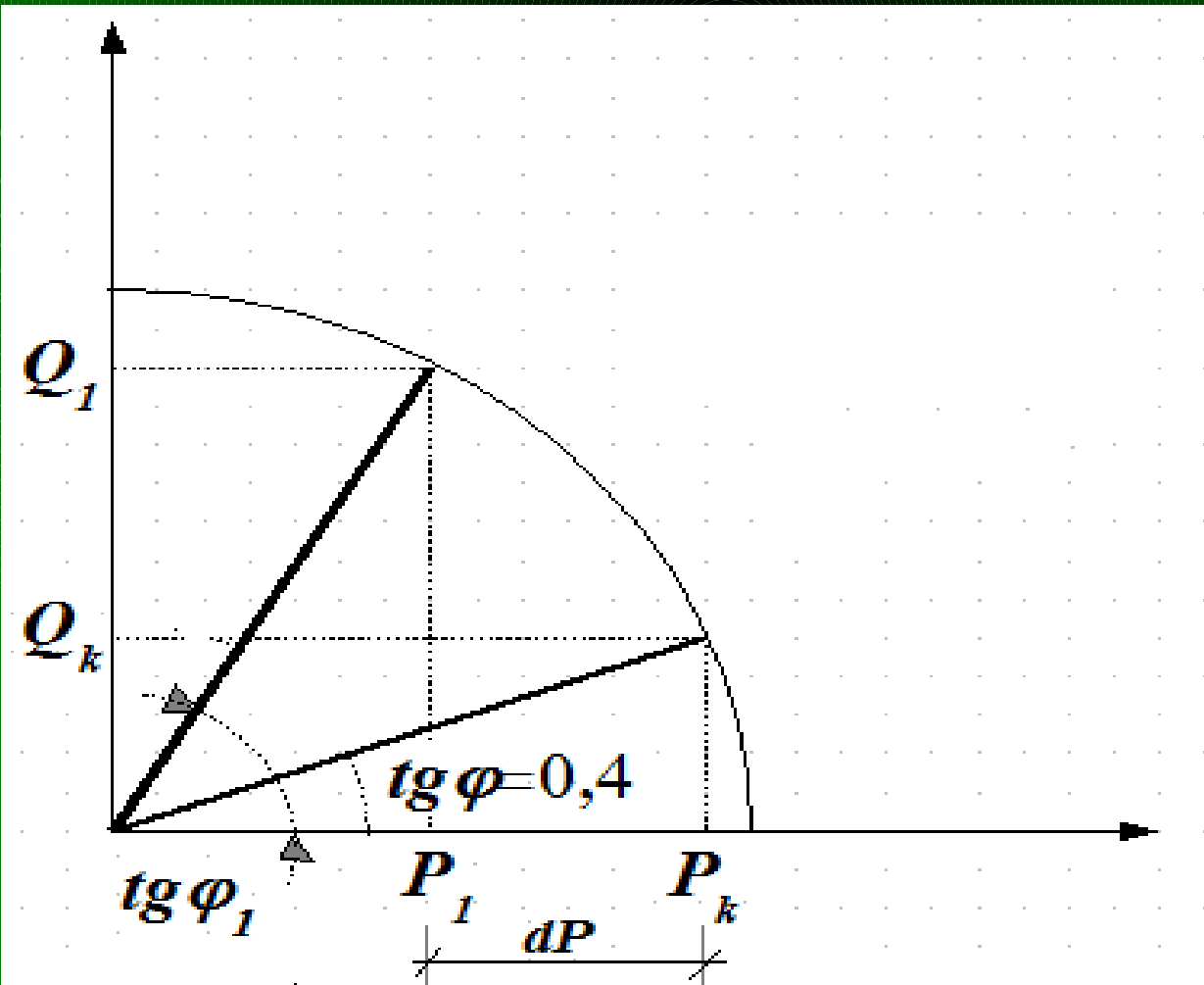
$\operatorname{tg} \varphi$ – współczynnik mocy,
pobranej przez odbiorcę w
okresie rozliczeniowym,

A – energię czynną pobraną



Problemy tematyki „Q a EE”

2. Problem sprawiedliwych rozliczeń za pobór mocy biernej



Można pokazać, że:

Oplata za ponadumowny
pobór mocy biernej O_b :

$$O_b \sim dP$$

$$O_b \neq Q_1$$

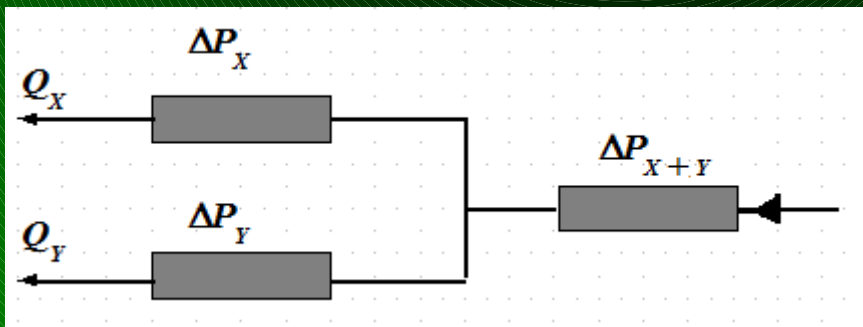
$$O_b \neq \Delta P \sim I^2 = I_{cz}^2 + I_b^2 + 2I_{cz}I_b$$

$$Q_1 \neq \Delta P$$

Problemy tematyki „Q a EE”

2. Problem sprawiedliwych rozliczeń za pobór mocy biernej

W przypadku sieci o konfiguracji drzewiastej – za straty na wspólnych odcinkach, odbiorcy odpowiadają nie proporcjonalnie w stosunku do ilości pobieranej mocy!



$$\Delta P \sim I^2 \sim S^2$$

gdy $P = 0$:

$$\Delta P_{x+y} \sim (Q_x^2 + Q_y^2 + 2Q_x Q_y)$$

W sieci bardziej rozgałęzionej sprawa komplikuje się „lawinowo” (składniki uwikłane sumy)

Problemy tematyki „Q a EE”

3. Rola mocy biernej w utrzymaniu bezpiecznej pracy SEE

Elementy SEE	Lato 2012 – szczyt [Mvar]	Lato 2012 – dolina [Mvar]
Zapotrzebowanie Q		
Węzły odbiorcze	5220	2956
Zespoły wytwórcze	1001	889
Praca pojemnościowa generatorów	16	400
Dławiki	b.d.	514
Straty :		
- w liniach (podłużne)	2549	1016
- w transformatorach sieciowych:		
podłużne	878	343
poprzeczne	79	80
- w transformatorach blokowych podłużne	2353	1121
RAZEM	12097	7321
Generacja Q		
Wywarzanie w generatorach	5511	1469
Węzły odbiorcze (przekompensowanie)	92	122
Linie	5843	5878
Baterie kondensatorów	678	b.d.
RAZEM	12124	7469

Źródło:

Kot A.: Balance Sheet and Analysis of Reactive Power Demand in the Polish Power System.
Acta Energetica 1/14(2013) s.68-71

Problemy tematyki „Q a EE”

3. Rola mocy biernej w utrzymaniu bezpiecznej pracy SEE

Rozwiązywane zadanie dla KSE

- poszukiwanie metod optymalizujących lokalizację źródeł Q w SEE, co kompromuje 2 funkcje celu:
 - Zmniejszenie strat przesyłowych mocy czynnej ΔP
 - Poprawa profili napięciowych w węzłach sieci

Zazwyczaj kryterium napięciowe ma wyższy priorytet – racjonalność przed efektywnością

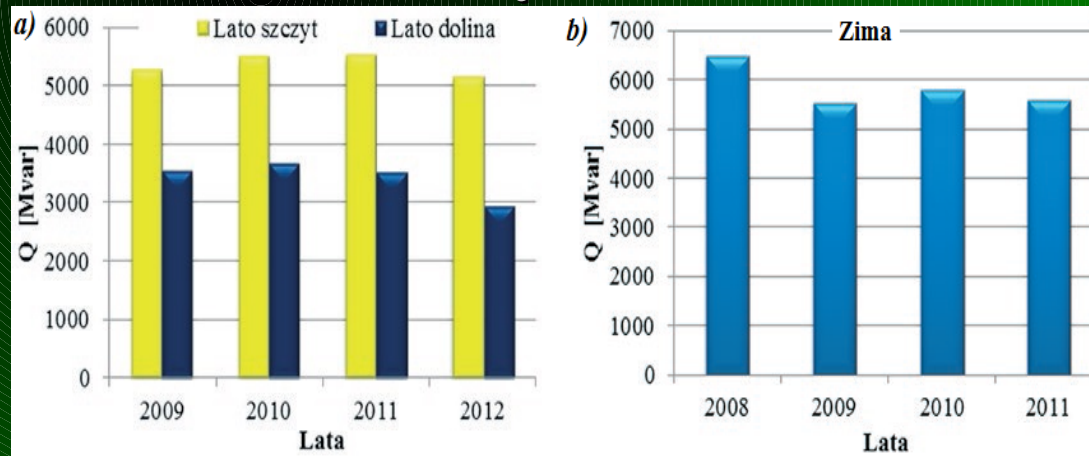
W praktyce, problemy obliczeniowe związane z rozwiązywaniem zadania utrudniają efektywne zastosowanie metod optymalizacji.

Analizuje się stabilność napięciową podsystemów elektroenergetycznych w kontekście problemów przeciążania mocą bierną.

Problemy tematyki „Q a EE”

3. Rola mocy biernej w utrzymaniu bezpiecznej pracy SEE

Zapotrzebowanie na Q w węzłach 110kV/SN w KSE 2008-2012



Źródło:
Kot A.: Balance Sheet and Analysis of Reactive Power Demand in the Polish Power System. *Acta Energetica* 1/14(2013) s.68-71

Trend spadkowy w rocznym poborze Q w KSE

- Kłopoty regulacyjne – kłopoty z opanowaniem podwyższonych napięć węzłowych w dolinach zapotrzebowania
- Interwencje regulacyjne OSP (uruchomienie pracy pojemnościowej generatorów) – utrata zdolności regulacji napięć (lokalny charakter zależności $U=f(Q)$)
- Konflikt interesów: OSD – ogranicza przepływy Q przez swoją sieć, OSP – musi dbać o bezpieczeństwo pracy SEE

Problemy tematyki „Q a EE”

4. Przepływ Q a EE – rozważania teoretyczne

Publikowane są prace, pokazujące jak zastosowanie nadążnej kompensacji Q zmniejszyło straty przesyłanej mocy, zwłaszcza w przypadku wielkich odbiorców energii elektrycznej, np.

Fryc E., Kochel Z., Krakowiak J., Ziarno R.: Możliwości poprawy efektywności wykorzystania energii elektrycznej czynnej i biernej. Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój Nr 1-2(11-12) 2012, s. 78-95

lub dla sieci testowej SEE, np.

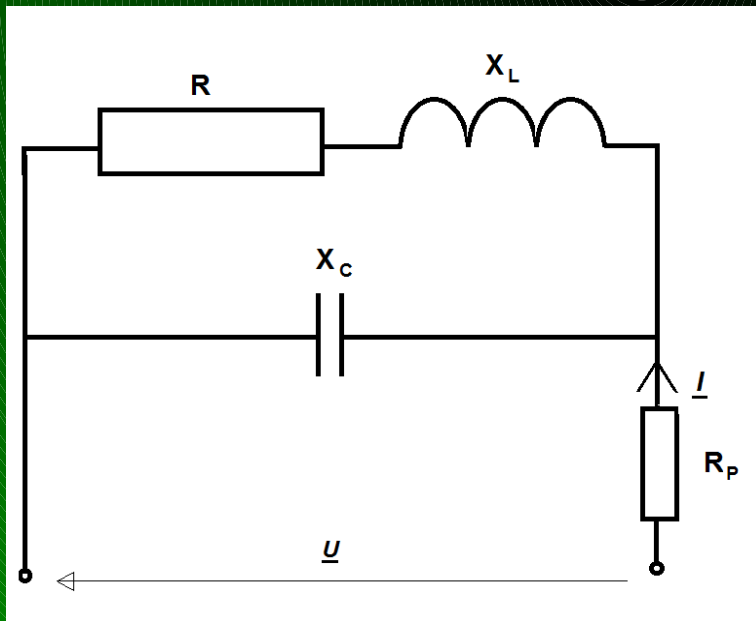
Wysocki W., Szlosek M.: Compensation of Reactive Power as a Method for Reducing Energy Losses. 11th International Conference Electrical Power Quality and Utilization EPQU 2011, s.1-5

Kluczowy etap opracowania algorytmu rozdzielania generacji Q to określenie przebiegu zależności $\Delta P(Q)$

Problemy tematyki „Q a EE”

4. Przepływ Q a EE – rozważania teoretyczne

Prosty model obwodu 1f z płynną kompensacją Q

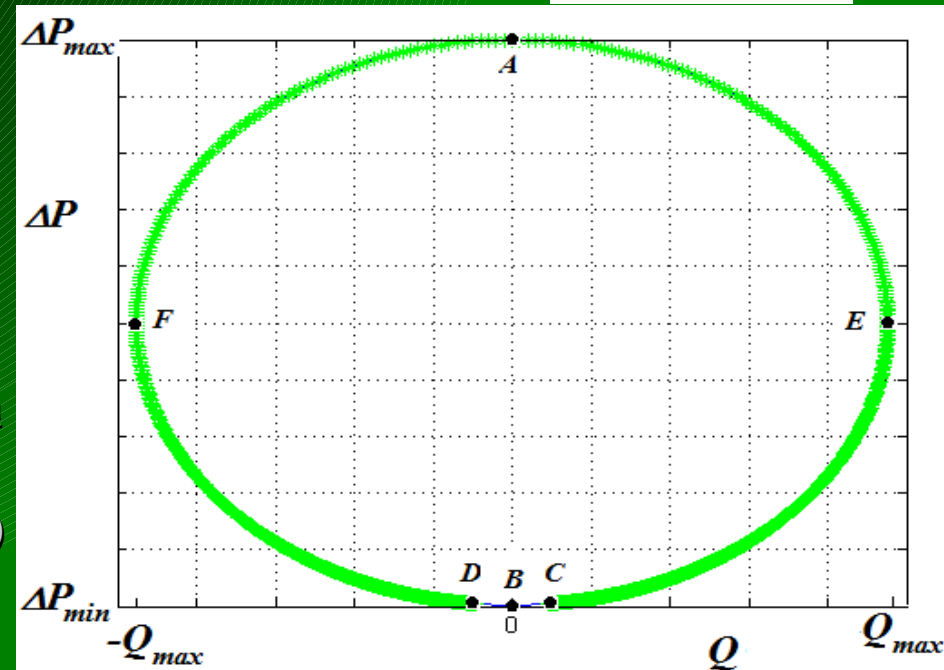


$$\Delta P = R_p I^2$$

$$Q = \text{Im}(\underline{Z}) I^2$$

$$\underline{Z} = [(R + jX_L) \parallel (-jX_C)] + R_p$$

$$\begin{cases} Q = \frac{\xi U^2}{\xi^2 + \chi R_p^2} \\ \Delta P = \frac{U^2 R_p}{\xi^2 + \chi R_p^2} \end{cases}$$



A – $X_C = 0$ zwarcie odbiornika gałęzią kompensującą

B – reaktancja rezonansowa $X_C = X_{C\text{rez}}$ - $Q = 0$

C – brak gałęzi kompensującej ($X_C \rightarrow +\infty$ lub $X_C \rightarrow -\infty$)

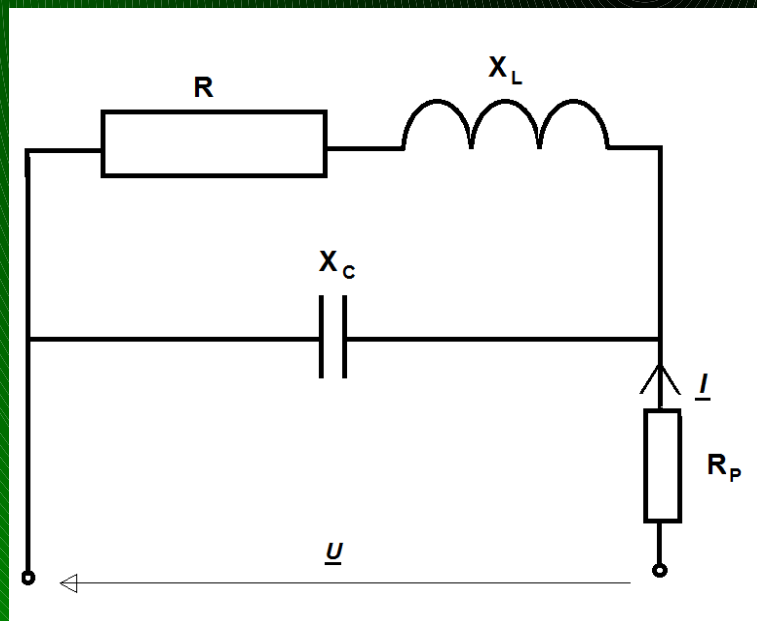
D – $X_C = \frac{1}{2} X_{C\text{rez}}$

E, F największe możliwe wartości $|Q|$ źródło - odbiornik

Problemy tematyki „Q a EE”

4. Przepływ Q a EE – rozważania teoretyczne

Prosty model obwodu 1f z płynną kompensacją Q

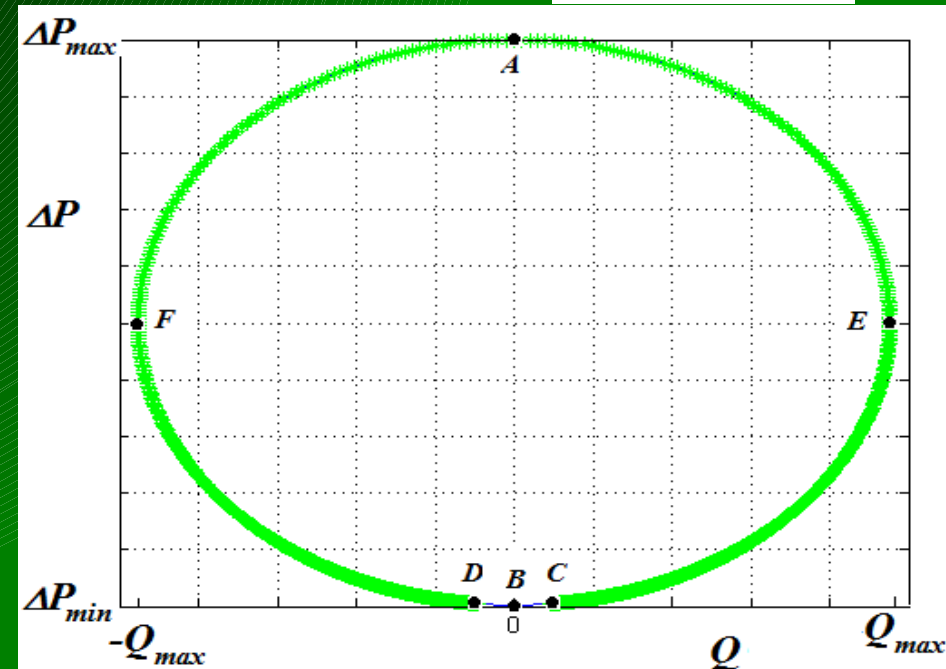


$$\Delta P = R_P I^2$$
$$Q = \text{Im}(\underline{Z}) I^2$$

$$\underline{Z} = [(R + jX_L) \parallel (-jX_C)] + R_P$$

$$\begin{cases} Q = \frac{\xi U^2}{\xi^2 + \chi R_P^2} \\ \Delta P = \frac{U^2 R_P}{\xi^2 + \chi R_P^2} \end{cases}$$

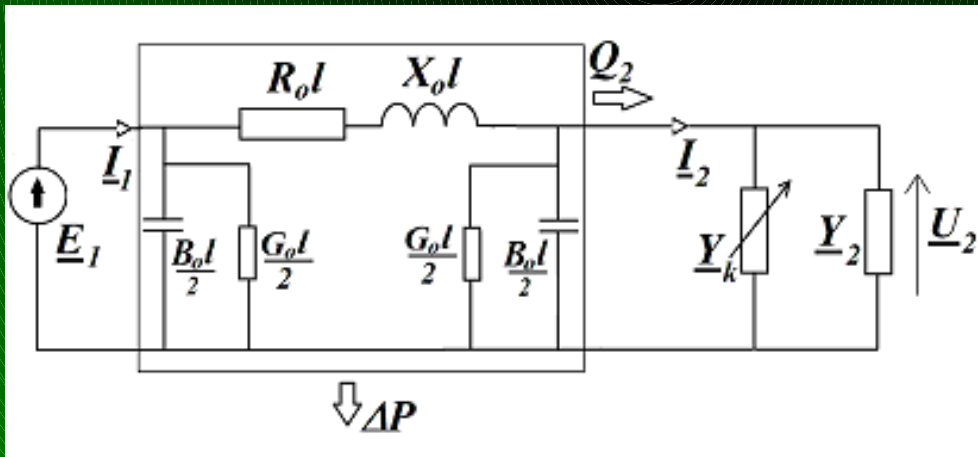
Część obwiedni FAE – zmniejszenie przepływu Q implikuje zwiększenie ΔP (fenomen teoretyczny – blisko zwarcia odbiornika, ale wskazuje na nietrywialność problemu!)



Problemy tematyki „Q a EE”

4. Przepływ Q a EE – rozważania teoretyczne

Model linii długiej



ZAObSERWOWANE FENOMENY:

- Punkt największej, możliwej sprawności energetycznej dostarczania energii nie pokrywa się z punktem dla którego obserwuje się brak przepływu mocy biernej ($Q=0$).
- Z wykresu widać, jak sterując przepływami mocy biernej Q_2 można regulować poziom napięcia w punkcie odbioru.

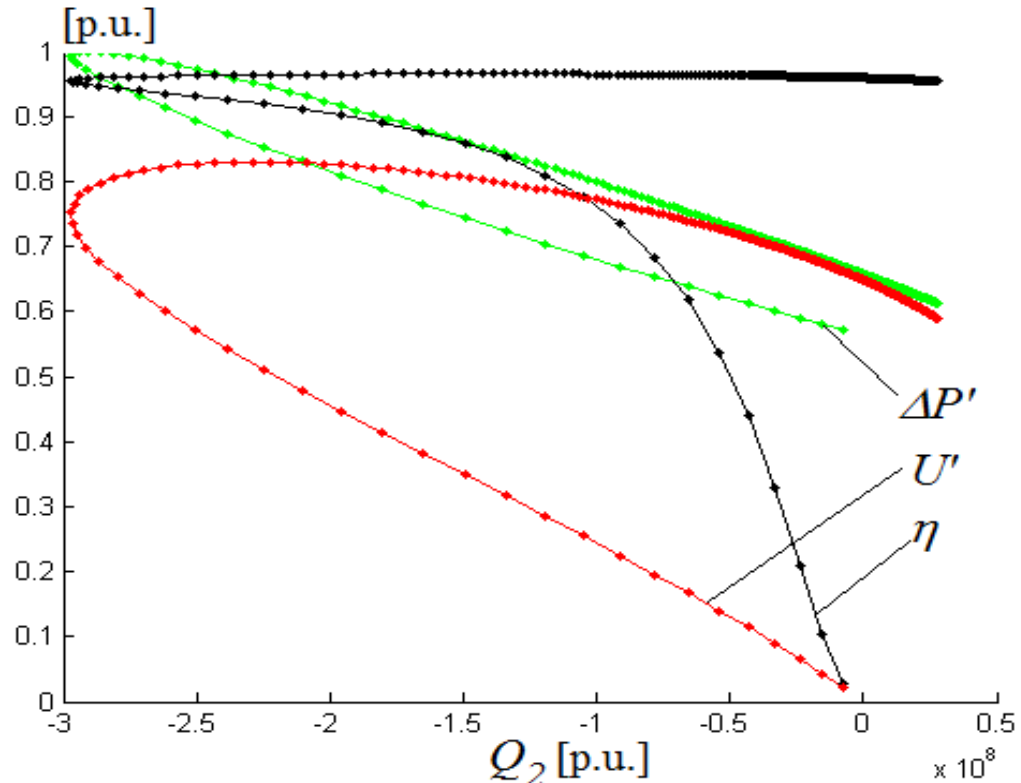
$$Q_2 = \text{Im}(\underline{U}_2 \underline{I}_2^*)$$

$$\Delta P = \text{Re}(\underline{E}_1 \underline{I}_1^*) - \text{Re}(\underline{U}_2 \underline{I}_2^*)$$

$$\eta = \frac{\text{Re}(\underline{U}_2 \underline{I}_2^*)}{\text{Re}(\underline{E}_1 \underline{I}_1^*)}$$

$$\Delta P'(i) = \frac{\Delta P(i)}{\max_i [\Delta P(i)]}$$

$$U_2(i)' = \frac{|\underline{U}_2(i)|}{|\underline{E}_1(i)|}$$



Podsumowanie

- **Q jest mocą nieaktywną, ale pożądaną w SEE.**
- **Przepływ Q powoduje dodatkowe straty w SEE.**
- **Wielkością przepływu Q można regulować poziom napięcia w węzłach sieci, zapewniając odpowiednią jakość i niezawodność pracy SEE.**
- **Problem ograniczenia przepływów Q w kontekście efektywności energetycznej powinien być rozpatrywany z punktu widzenia racjonalnej gospodarki energetycznej w SEE – kompromis między stratami technicznymi energii a dotrzymaniem parametrów jakościowych napięcia zasilającego.**
- **W oparciu o ideę *Smart Grid* i z wykorzystaniem technik *Smart Metering* należy spodziewać się pojawienia się „dynamicznego współczynnika mocy” $\text{tg}\varphi$. Wielkość ta będzie mieć charakter lokalny i będzie zmieniać się w ciągu doby.**

Podsumowanie

- Świadomy prosument na nowoczesnym rynku energii będzie musiał dodatkowo mieć na uwadze nie tylko aktualną cenę za energię czynną, ale również i bierną
- Wymagać to wszystko będzie przeprowadzenia odpowiednich prac badawczych, mających na celu uporządkowanie problematyki (z definicją Q włącznie) oraz opracowania algorytmów sterujących przepływami Q i rozliczającymi pobór/generację Q w SEE w sposób sprawiedliwy i adekwatny do sytuacji KSE
- Prace powinny czerpać z dziedzin:
 - ◆ Elektroenergetyka (niezawodność i jakość pracy SEE)
 - ◆ Teoria mocy obwodów (uogólniona definicja i interpretacja)
 - ◆ Efektywność energetyczna (ograniczanie strat energii)
 - ◆ Ekonomika energetyczna (konstrukcja taryf i rozliczeń)

Podsumowanie

Wnioski:

Z uwagi na poprawę efektywności energetycznej, przepływy mocy biernej w sieciach i instalacjach elektroenergetycznych powinny być ograniczane, lecz dokonywane to być powinno w oparciu o postulat racjonalnego użytkowania energii (spojrzenie holistyczne na problematykę efektywności energetycznej, tj. w ujęciu systemowym i z punktu widzenia całej gospodarki energetycznej).

W ustawie nie potrzebne są szczegółowe sformułowania dotyczące problematyki technicznej i inżynierskiej.

DZIĘKUJĘ



Niniejsza praca jest współfinansowana przez **Unię Europejską**
w ramach **Europejskiego Funduszu Społecznego**, poprzez realizację projektu
*Program rozwoju dydaktycznego Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa
Politechniki Warszawskiej.*

