

## Modes of Interphase Power Controller Operation

Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Tirsu M.S., Golub I.V.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova  
Chisinau, Republic of Moldova

**Abstract.** The IPC (Interphase Power Controller) technology is a developing direction in the domain of power systems interconnections. The practical application of these devices will improve the efficiency of power systems operation and prevent the spread of undesirable phenomena in electric networks. This may result in new regimes effects that require special consideration and analysis. The paper discusses some features of IPC operation at the installation of it on the input end of transmission line. The purpose was to study the characteristics of the transmission line, when on the transmitting end was mounted uncontrolled IPC with centered characteristics. Additional ways of using the phase shifting transformers (PST) to adjust the power characteristics of IPC are considered as well. In this case the PST acts as a reactive power compensator. Favorable conditions IPC operation can be obtained by applying an additional phase-shifting element mounted IPC for power at the receiving end. It is concluded that the installation phase-shifting device (beginning or end of the line) does not matter and it can be determined based on specific conditions. Results testify the possibility of full harmonization of IPC with the line in all practical cases.

**Keywords:** interphase power controller, power transmission, phase shifting transformer, susceptances.

### Regimuri de funcționare a regulatorului parametric de putere

Calinin L., Zaițev D., Tîrșu M., Golub I.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei  
Chișinău, Republica Moldova

**Rezumat.** Regulatorul parametric de putere transmisă (IPC, Interphase Power Controller) posedă caracteristici principale diferite față de instalațiile tradiționale de transmitere a energiei electrice între nodurile rețelei de transport. Acest fapt, poate fi cauza apariției noilor efecte de regim, ce necesită o considerare și o analiză specială. În lucrarea dată se analizează caracteristicile de transmitere a sistemului în cazul montării unui IPC nedirijat la capătul liniei. Sunt prezentate și analizate caracteristicile, care indică relație de cauzalitate pentru unii indici de regim. S-a demonstrat, că condiții favorabile de funcționare a IPC pot fi obținute în rezultatul utilizării unui element suplimentare de reglare a fazei montat după IPC la capătul liniei de transmisie. S-a determinat, că locul amplasării elementului de reglare a fazei (început sau capăt) nu are mare importanță și poate fi determinat reieșind din condițiile concrete. Rezultatele obținute confirmă, că racordarea totală a IPC cu linia este posibilă în orice situații practice.

**Cuvinte-cheie:** sursă de curent continuu, transportul energiei electrice, transformator de reglare a decalajului de fază, conductibilități conjugate.

### Режимы работы параметрического регулятора мощности

Калинин Л.П., Зайцев Д.А., Тыршу М.С., Голуб И.В.

Институт энергетики Академии наук Молдовы  
Кишинев, Республика Молдова

**Аннотация.** Обладая качествами, которые принципиально отличают параметрический регулятор мощности (IPC, Interphase Power Controller) от традиционных технических средств передачи электрической энергии между узлами транспортной сети, устройство может быть причиной возникновения новых режимных эффектов, требующих специального рассмотрения и анализа. Целью работы являлось исследование характеристик передачи при установке на передающем конце неуправляемого IPC с центрированными характеристиками. Представлены и проанализированы зависимости, определяющие причинно-следственную связь между отдельными показателями режима. Установлено, что достаточно благоприятные условия работы IPC могут быть получены за счет применения дополнительного фазорегулирующего элемента, установленного за IPC на приемном конце электропередачи. Сделан вывод о том, что место установки фазорегулирующего устройства (начало или конец линии) принципиального значения не имеет и может быть определено, исходя из конкретных условий. Полученные результаты свидетельствуют о возможности полного согласования IPC с линией в любых практических ситуациях.

**Ключевые слова:** источник неизменного тока, электропередача, фазорегулирующий трансформатор, сопряженные проводимости.

**Введение**

Устройство ИРС, используемое в режиме стабилизатора активной мощности (Decoupling Interconnector), является источником неизменного тока. Практическое применение таких устройств следует считать целесообразным на стыке энергосистем с отличающимися стандартами по допустимому динамическому отклонению частоты. Такая ситуация может иметь место в том случае, если необходимо обеспечить обмен мощностью между системами, в которых действуют автоматические регуляторы частоты с различным значением зоны нечувствительности к отклонениям регулируемого параметра. При этом синхронизирующая мощность через ИРС не передается, а задача синхронизации решается другими электрическими связями более высокого иерархического уровня. Не являясь функционально активным элементом стабилизации динамических процессов, устройство ИРС препятствует их передаче в смежную систему [1-8].

**I. Неуправляемый ИРС с центрированными характеристиками**

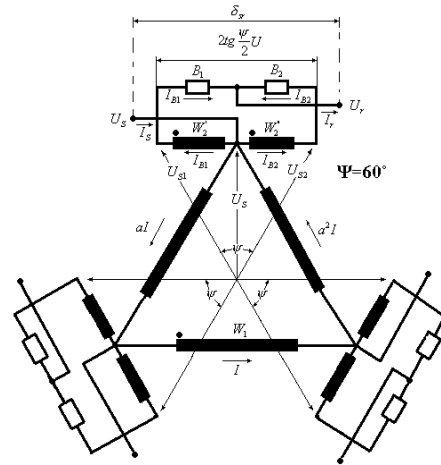
Технология ИРС является развивающимся направлением электроэнергетики, включает многообразие технических решений, использование которых способствует повышению эффективности работы энергосистем. Наиболее простым вариантом устройства следует считать неуправляемый ИРС с центрированными характеристиками (Generic IPC). Схема неуправляемого ИРС представлена на Рис.1.

Из геометрических соотношений, определяющих связь между векторными величинами, характеризующими режим устройства, следует:

$$\begin{cases} U_{B1} = U_r - U_{S1} \\ U_{B2} = U_r - U_{S2} \end{cases} \quad (1)$$

Раскрывая правые части этих уравнений получим:

$$\begin{cases} U_{B1} = U_r e^{j\delta_{sr}} - \frac{U_S}{\cos \frac{\psi}{2}} e^{-j\frac{\psi}{2}} \\ U_{B2} = U_r e^{j\delta_{sr}} - \frac{U_S}{\cos \frac{\psi}{2}} e^{j\frac{\psi}{2}} \end{cases} \quad (2)$$



**Рис.1. Вариант неуправляемого ИРС с центрированными характеристиками.**

Токи проводимостей  $B_1$  и  $B_2$  при условии, что проводимость  $B_1$  образована индуктором, а  $B_2$  - батареей статических конденсаторов, могут быть представлены следующим образом:

$$I_{B1} = -jB_1 U_{B1}; \quad I_{B2} = jB_2 U_{B2}. \quad (3)$$

Ток  $I_r$  на выходе устройства является суммой токов двух сопряженных проводимостей. Учитывая представленные соотношения, а также принимая условие  $|B_1| = |B_2| = B$ , приходим к результату:

$$I_r = I_{B1} + I_{B2} = jB(U_{B2} - U_{B1}) = 2Btg \frac{\psi}{2} U_S. \quad (4)$$

Это означает, что ток  $I_r$  не зависит от напряжения  $U_r$  и при постоянстве значений  $B, \psi$  и  $U_S$ , остается неизменным.

Полная мощность на выходе ИРС может быть определена как произведение тока  $I_r$  на сопряженное напряжение  $S_r = I_r U_r^* = I_r U_r e^{-j\delta_{sr}}$ .

Величина  $U_r$  определяется напряжением приемной системы. При непосредственном включении ИРС между двумя узлами одинакового напряжения, т.е. при  $|U_r| = |U_S| = U$  получаем:

$$S_r = I_r U e^{-j\delta_{sr}} = 2Btg \frac{\psi}{2} U^2 e^{-j\delta_{sr}}. \quad (5)$$

Устройство ИРС в этом случае выполняет функции стабилизатора активной мощности, а его характеристики имеют вид, представленный на Рис.2.

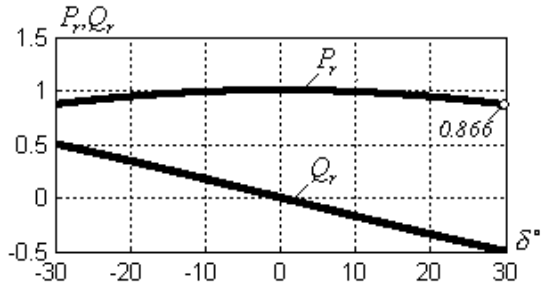


Рис.2. Характеристики мощности неуправляемого ИПС с центрированными характеристиками..

Активная ( $P_r$ ) и реактивная ( $Q_r$ ) составляющие полной мощности  $S_r$  при этом будут определяться соотношениями:

$$P_r = S_{rm} \cos \delta; Q_r = -S_{rm} \sin \delta, \quad (6)$$

$$\text{где } S_{rm} = 2BU^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}. \quad (7)$$

Напряжения  $U_{B1}$  и  $U_{B2}$ , прикладываемые к соответствующим парным проводимостям при колебаниях  $\delta_{sr}$  в диапазоне от  $-30^\circ$  до  $+30^\circ$ , изменяются в соответствии с графиками Рис.3.

Встречное изменение этих напряжений при изменении  $\delta$  способствует поддержанию  $I_r$  на заданном уровне.

Характеристики Рис.2, и Рис.3 соответствуют непосредственному (при отсутствии линии электропередачи) включению ИПС между узлами сети и могут считаться базовыми для последующих сопоставлений с вариантами включения устройства в линию, параметры которой влияют на режим работы ИПС.

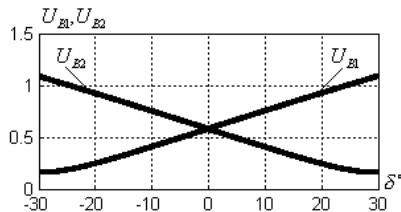


Рис.3. Характеристики напряжений на парных проводимостях

Условия работы неуправляемого ИПС совместно с линией представлены на Рис.4.

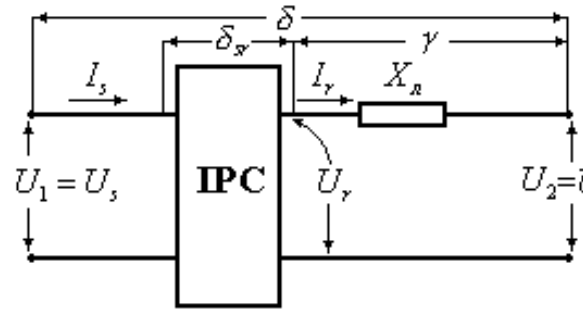


Рис.4. Схема работы неуправляемого ИПС с линией электропередачи..

Учитывая необходимость представления основных особенностей работы ИПС, рассматривать будем линию без потерь ( $R_L = 0$ ) с сосредоточенным продольным индуктивным сопротивлением  $X_L$ . Поперечной проводимостью линии пренебрегаем.

Векторные диаграммы, характеризующие состояние электропередачи при различных значениях угла  $\delta$ , изображены на Рис.5.

При изменении угла  $\delta$  значение  $I_r X_L$  остается неизменным, поскольку устройство является источником неизменного тока, а переменными величинами становятся  $U_r$  и  $\delta_{sr}$ .

Из рассмотрения векторных диаграмм следует:

$$U_r = U_2 e^{j\delta} - jI_r X_L. \quad (8)$$

При этом модуль «плавающего» с изменением угла  $\delta$  напряжения  $U_r$  будет определяться соотношением:

$$U_r = \sqrt{U_2^2 - I_r X_L (2U_2 \sin \delta - I_r X_L)}. \quad (9)$$

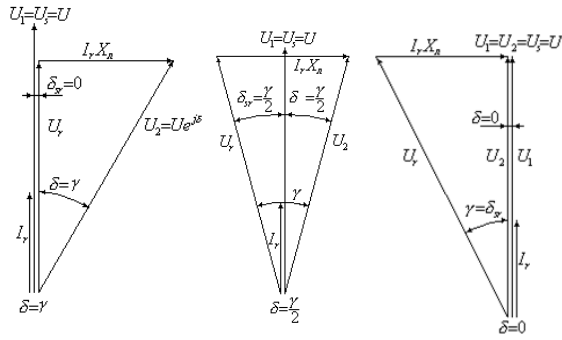


Рис.5. Векторные диаграммы электропередачи

Анализ векторных диаграмм позволяет также записать уравнение, определяющее характер изменения  $\delta_{sr}$  в зависимости от угла  $\delta$ :

$$U_2 \sin \delta - I_r X_{Л} = U_r \sin \delta_{sr}.$$

Тогда, с учетом  $U_r(\delta)$ , получаем:

$$\delta_{sr} = \arcsin \frac{U_2 \sin \delta - I_r X_{Л}}{\sqrt{U_2^2 - I_r X_{Л} (2U_2 \sin \delta - I_r X_{Л})}} \quad (10)$$

Зная характер изменения  $\delta_{sr}(\delta)$ , можно определить изменяющееся значение угловой длины линии  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} \gamma &= \delta - \delta_{sr} = \\ &= \delta - \arcsin \frac{U_2 \sin \delta - I_r X_{Л}}{\sqrt{U_2^2 - I_r X_{Л} (2U_2 \sin \delta - I_r X_{Л})}} \quad (11) \end{aligned}$$

Закон изменения напряжений, приложенных к проводимостям  $B_1$  и  $B_2$  в рассматриваемых условиях, будет соответствовать уравнениям:

$$\begin{cases} U_{B1} = \\ = \sqrt{(U_r \cos \delta_{sr} - U_S)^2 + \left( U_r \sin \delta_{sr} + U_S \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right)^2} \\ U_{B2} = \\ = \sqrt{(U_r \cos \delta_{sr} - U_S)^2 + \left( U_r \sin \delta_{sr} - U_S \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

Составляющие  $P_r$  и  $Q_r$  полной мощности на выходе неуправляемого ИРС, установленного на передающем конце линии, будут характеризоваться следующим образом:

$$\begin{cases} P_r = 2B \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} U_S U_r \cos \delta_{sr} \\ Q_r = -2B \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} U_S U_r \sin \delta_{sr} \end{cases} \quad (13)$$

Полученные соотношения для  $U_r$  и  $\delta_{sr}$  дают возможность определить влияние линии на характеристики  $P_r$  и  $Q_r$ .

Наглядность получаемых результатов будет обеспечена при соответствующей конкретизации расчетных условий. В качестве основного расчетного условия зададимся фиксированным значением длины линии, при которой продольное падение напряжения соответствует  $\gamma = 15^\circ$ . Это будет обеспечено, если  $I_r X_{Л} = U_2 \sin \gamma = 0.259 U_2$ .

Используя соотношения (9÷13) строим характеристики, определяющие зависимость расчетных величин от угла  $\delta$ , которые представлены на Рис.6.

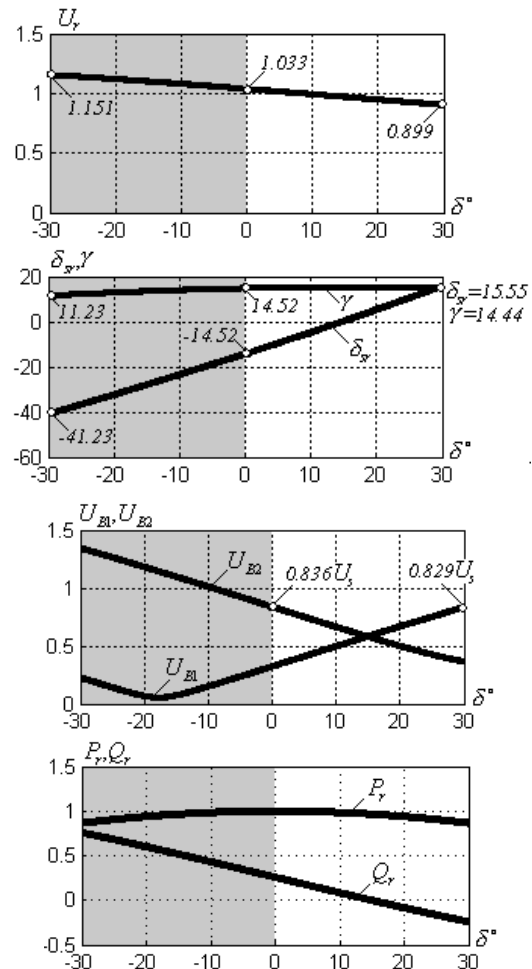


Рис.6. Зависимость расчетных величин от угла.

Из рассмотрения полученных результатов видно, что характеристика  $P_r(\delta)$  осталась центрированной, а характеристика  $Q_r(\delta)$  сместилась на  $15^\circ$  в правую сторону, что приводит к существенному возрастанию реактивной мощности в области  $\delta < 0^\circ$ . В этой же области наблюдается значительное возрастание напряжения  $U_{B2}$ , что влечет за собой необходимость увеличения расчетной мощности проводимости  $B_2$ . Колебания напряжения  $U_r$  находятся в пределах от 0.899 до 1.151. С увеличением длины линии пределы колебания  $U_r$  будут увеличиваться.

Наиболее благоприятные условия работы ИРС соответствуют положительной области диапазона изменения угла  $\delta$  ( $0^\circ \div 30^\circ$ ). В целом можно утверждать, что влияние линии накладывает определенные ограничения на рабочий диапазон по углу  $\delta$ . Для устранения этого недостатка необходимо использовать специальные меры.

## II. Неуправляемый ИРС в сочетании с фазорегулирующим трансформатором на противоположном конце линии

Рабочие характеристики неуправляемого ИРС, размещенного в начале линии, могут быть подвергнуты корректировке с помощью фазорегулирующего трансформатора (Phase Shifting Transformer – PST), установленного на противоположном конце как показано на Рис.7. При этом фазорегулирующий трансформатор приобретает новые функциональные свойства - регулятора реактивной мощности.

Характеристики режима при  $\beta = \delta$  показаны на рис.8. Для реализации указанного закона требуется фазорегулирующий трансформатор, обеспечивающий регулирование угла  $\beta$  в диапазоне  $\pm 30^\circ$ .

Расчетные значения  $\delta_{sr}, \gamma, U_{B1}, U_{B2}, P_r$  и  $Q_r$  в этих условиях стабильны и независимы от угла  $\delta$ .

На выходе устройства поддерживается постоянство реактивной мощности на уровне  $Q_r = 0.259$ . Указанное обстоятельство следует считать положительным фактором.

Характеристики режима при  $\beta = \delta - 15^\circ$  показаны на рис.9.

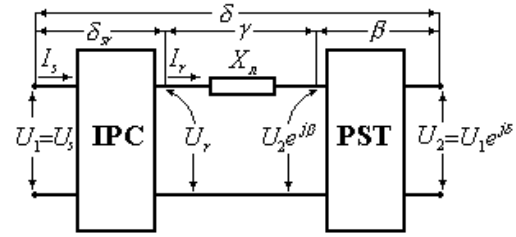


Рис.7. Схема неуправляемого ИРС и PST.

При регулировании угла  $\beta$  с помощью PST соотношения (10) и (11) приобретают вид:

$$\delta_{sr} = \arcsin \frac{U_2 \sin(\delta - \beta) - I_r X_L}{\sqrt{U_2 - I_r X_L (2U_2 \sin(\delta - \beta) - I_r X_L)}}; \quad (14)$$

$$\gamma = (\delta - \beta) - \arcsin \frac{U_2 \sin(\delta - \beta) - I_r X_L}{\sqrt{U_2 - I_r X_L (2U_2 \sin(\delta - \beta) - I_r X_L)}}. \quad (15)$$

В зависимости от закона управления  $\beta = f(\delta)$  могут быть созданы различные режимные ситуации. Рассмотрим следующие законы управления:

- 1)  $\beta = \delta$ ; 2)  $\beta = \delta - 15^\circ$ ;
- 3)  $\beta = \frac{\delta}{2}$ ; 4)  $\beta = \frac{\delta}{2} - 15^\circ$ .

Указанные линейные законы выбраны в целях иллюстрации возможности управления режимом ИРС с помощью PST на противоположном конце линии. В зависимости от требований со стороны энергосистемы могут быть использованы и другие законы управления, а также различные их сочетания.

Для реализации указанного закона требуется фазорегулирующий трансформатор с диапазоном регулирования  $\beta$  в пределах от  $+15^\circ$  до  $-45^\circ$ . Такое (несимметричное) регулирование неблагоприятно отражается на расчетной мощности PST, который оказывается более громоздким и дорогостоящим, чем при  $\beta = \delta$ . Рабочие характеристики ИРС по активной и реактивной мощности при  $\beta = \delta - 15^\circ$  становятся идеальными.

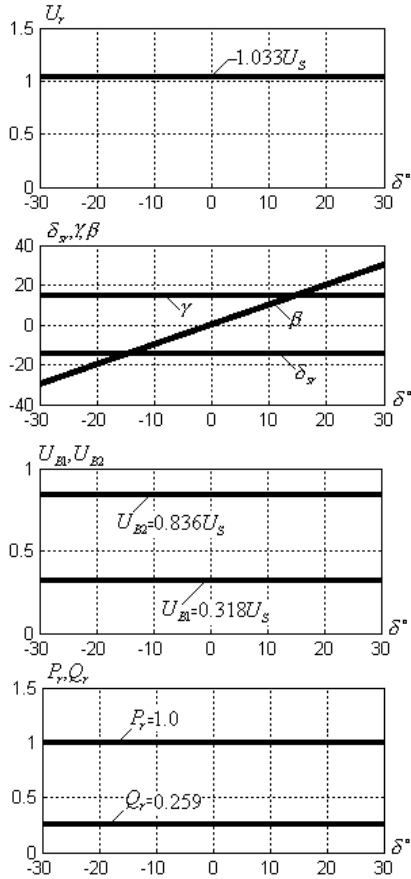


Рис.8. Характеристики режима при  $\beta = \delta$ .

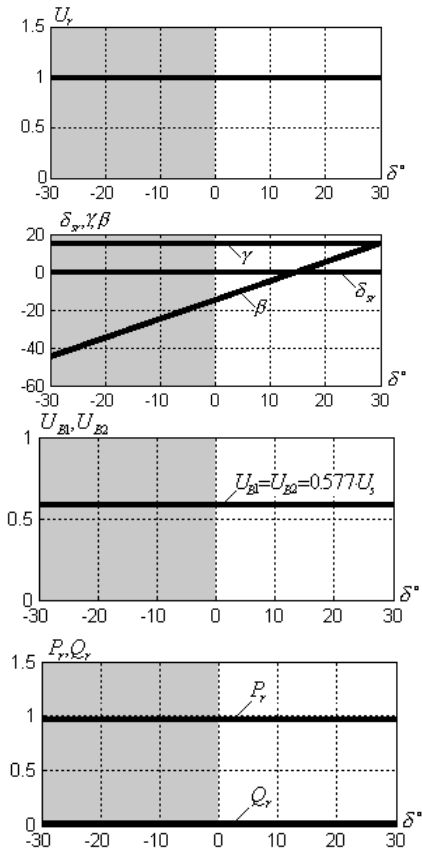


Рис.9. Характеристики режима при  $\beta = \delta - 15^\circ$ .

Реактивная мощность на выходе устройства постоянно поддерживается на нулевом уровне, а напряжения, приложенные к парным проводимостям, одинаковы  $U_{B1} = U_{B2} = 0.577U_s$ . Свободное регулирование реактивной мощности при  $P_r = 1$  в пределах от  $Q_r = 0$  до  $Q_r = 0.259$  обеспечит закон  $\beta = \delta - \alpha$ , где  $\alpha$  изменяется от  $0^\circ$  до  $15^\circ$ .

Характеристики режима при  $\beta = \frac{\delta}{2}$  показаны на Рис.10.

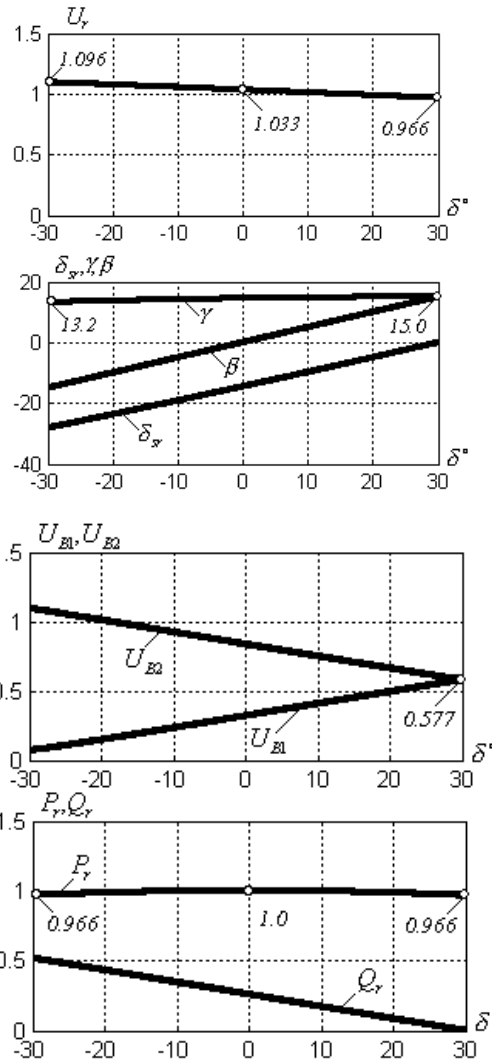


Рис.10. Характеристики режима при  $\beta = \frac{\delta}{2}$ .

Диапазон регулирования угла  $\beta$  находится в пределах  $\pm 15^\circ$ . Это означает, что фазорегулирующий трансформатор требует значительно меньше капитальных затрат, чем в двух ранее рассмотренных случаях.

Характеристика  $P_r = (\delta)$  достаточно стабильна, однако характеристика  $Q_r(\delta)$  сместилась на  $30^\circ$  в левую сторону. В процессе регулирования угла  $\delta$  мощность  $Q_r$  сохраняет свой знак, практически линейно возрастая от нуля до 0.518 справа налево.

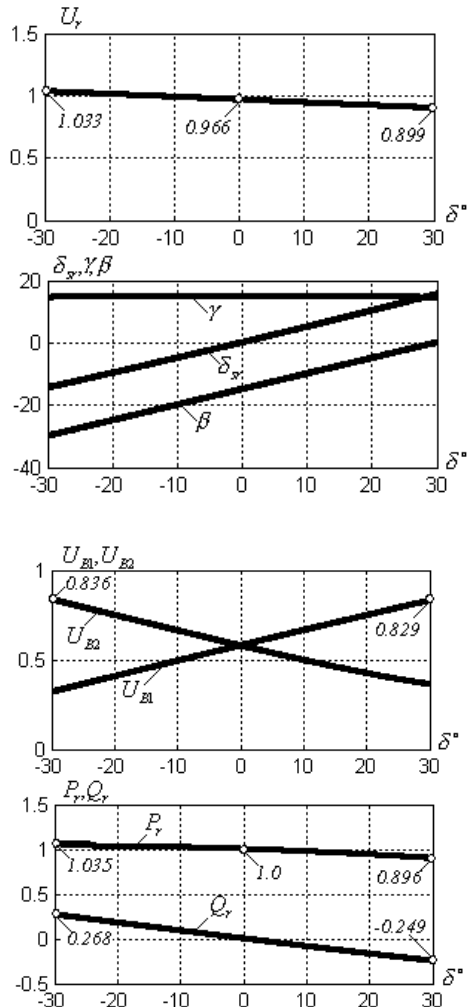


Рис.11. Характеристики режима при  $\beta = \delta/2 - 15^\circ$ .

Характеристики режима при  $\beta = \frac{\delta}{2} - 15^\circ$  показаны на Рис.11. Фазорегулирующий трансформатор в этом случае работает в области отрицательных значений угла  $\beta$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $-30^\circ$ .

Положительным проявлением данного закона управления следует считать практически симметричный характер изменения напряжений  $U_{B1}$  и  $U_{B2}$ , а также достаточно низкий уровень сопровождающей реактивной мощности при  $\delta = \pm 30^\circ$ . В то же время характеристика  $P_r(\delta)$  несколько

искажена, что объясняется возрастанием напряжения  $U_r$  в области отрицательных значений угла  $\delta$ .

## Выводы

1. При установке ИРС на передающем конце линии и подключении фазосдвигающего трансформатора непосредственно к шинам питающей системы напряжение на выходе устройства ( $U_r$ ) находится в прямой зависимости от угла  $\delta$ . В области положительных значений угла  $\delta$  наблюдается понижение  $U_r$ , в области отрицательных значений этого угла – повышение. С увеличением угловой длины линии пределы колебаний напряжения  $U_r$  расширяются.

2. Колебания напряжения  $U_r$  или  $U_s$  способствуют симметрированию характеристики  $P(\delta)$ . В то же время характеристики  $Q_r(\delta)$  и  $Q_s(\delta)$  смещаются. Рабочей зоной устройства следует считать  $\delta > 0$ .

3. Достаточно благоприятные условия работы ИРС могут быть получены за счет применения дополнительного фазорегулирующего элемента, однако установка еще одного силового регулирующего устройства вряд ли может быть экономически обоснована.

4. Место установки устройства (начало или конец линии) принципиального значения не имеет и может быть определено, исходя из конкретных условий, которые существуют на трансформаторной подстанции.

5. Выполненная работа свидетельствует о возможности полного согласования ИРС с линией в любых практических ситуациях.

## Литература (References)

- [1] Application of the Interphase Power Controller Technology for Transmission Line Power Flow Control, J.Brochu, F.Beauregard, Pelletier Et al., IEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, No.2, April, 1997.
- [2] Interphase Power Controllers –complementing the family of FACTS controllers. J.Brochu,

- F. Beauregard, Pelletier Et al., IEEE Canadian Review – Spring / Printemps 2000.
- [3] N.G. Hingorani, L. Gyugui, 2000, “Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems”, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- [4] E. Acha, C. R. Fuerte-Eaquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, 2004, “FACTS, Modeling and simulation in power networks”, John Wiley and Sons, England.
- [5] P. Hurllet, J.-C. Riboud, J. Margoloff, and A. Tanguy, “French experience in phase-shifting transformers,” in Proc. CIGRE Session 2006 – A2-204, Aug. 2006.
- [6] J. Brochu, F. Beauregard, G. Morin, J. Lemay, P. Pelletier, S. Kheir, “The IPC technology - a new approach for substation uprating with passive short-circuit limitation”, Paper PE-830-PWRD-0-04-1997, IEEE/PES 1997 Winter Meeting, Tampa, FL.
- [7] J. Lemay et al, “The Plattsburgh interphase power controller”, IEEE/PES 1999 T&D Conference and Exposition, New Orleans, April 11-16, 1999.
- [8] J. Brochu, “Interphase Power Controllers”, Book, Polytechnics International Press, 1999.

**Об авторах:**



**Калинин Лев Павлович,**  
[kalinin\\_lev@ie.asm.md](mailto:kalinin_lev@ie.asm.md)  
Институт Энергетики АНМ,  
кандидат технических наук.  
Область научных интересов  
связана с разработкой и  
применением FACTS  
контроллеров в энергосистемах.



**Тыршу Михаил Степанович,**  
[tirsu.mihai@gmail.com](mailto:tirsu.mihai@gmail.com)  
Институт Энергетики АНМ,  
кандидат технических наук.  
Научные интересы связаны с  
диагностикой высоковольтного  
оборудования и силовой  
электроникой.



**Зайцев Дмитрий**  
**Александрович,**  
[zaiats@ie.asm.md](mailto:zaiats@ie.asm.md)  
Институт Энергетики АНМ,  
кандидат технических наук.  
Научные интересы лежат в  
области исследования режи-  
мов энергосистем.



**Голуб Ирина Владимировна,**  
[irina.golub@mail.ru](mailto:irina.golub@mail.ru)  
Институт Энергетики АНМ.  
Область научных интересов  
исследование режимов  
энергосистем, управляемых  
линий электропередачи.