

ВЛИЯНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ TCSC НА ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ

Мелибоев Ж.Ш.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

<https://doi.org/10.5281/zenodo.11278972>

Аннотация: В мире особое внимание уделяется определению запасов устойчивости электрических систем в связи с высокими темпами роста спроса на электроэнергию. Применение технологий передачи HVDC и FACTS добавили новые методы управления в энергосистеме, увеличили пропускную способность электрических сетей и улучшили возможности мониторинга. Стабилизаторы энергосистем PSS (power system stabilizers) традиционно применяются для гашения электромеханических низкочастотных колебаний в диапазоне частот 0,2–1,5 Гц. В этой работе предложено использование систем управления устройств последовательной компенсации TCSC (thyristor-controlled series capacitors) в качестве демпфера колебаний.

Ключевые слова: электроэнергетическая система; TCSC; колебания мощности; POD-контроллер.

INFLUENCE OF TCSC CONTROL SYSTEMS ON OSCILLATION DAMPING

Abstract: In the world, special attention is paid to determining the stability margins of electrical systems in connection with the high growth rates of demand for electricity. In this regard, special attention is paid to research aimed at improving the stability and dynamic properties of electric power systems, including through the use of modern control methods based on intelligent systems. The application of HVDC and FACTS transmission technologies have added new control methods to the power system, increased the throughput of electrical networks, and improved monitoring capabilities. Power system stabilizers (PSS) are traditionally used to damp electromechanical low-frequency oscillations in the frequency range 0.2–1.5 Hz. This paper proposes the use of thyristor-controlled series capacitors (TCSC) control systems as a oscillations damper.

Keywords: electric power system; TCSC; power oscillations; POD controller.

ВВЕДЕНИЕ

Последовательная компенсация успешно используется в течении многих лет в электрических сетях.

Схемы управляемых устройств последовательной компенсации TCSC включают управляемые реакторы, включенные параллельно с секциями конденсаторных батарей. Эта комбинация позволяет осуществлять плавное регулирование емкостного сопротивления в достаточно широком диапазоне [1].

Управляемые устройства продольной компенсации TCSC обладают некоторыми основными преимуществами по сравнению со своими шунтирующими аналогами. Для достижения тех же системных преимуществ, что и у последовательных конденсаторов, необходимо использовать шунтирующие конденсаторы, номинальная реактивная мощность которых в три-шесть раз больше, чем у последовательных конденсаторов [2]. Кроме того, шунтирующие конденсаторы

обычно должны быть подключены в средней точке линии, тогда как для последовательных конденсаторов такого требования нет.

Использование тиристорного управления в устройствах последовательной компенсации потенциально дает следующие преимущества [3-5]:

1. Непрерывный контроль уровня последовательной компенсации линии передачи.
2. Динамическое управление потоком мощности в выбранных линиях передачи в сети для обеспечения оптимальных условий перетока мощности.
3. Демпфирование качаний мощности от локальных и межсистемных колебаний.
4. Повышенный уровень защиты последовательных конденсаторов. Быстрое шунтирование последовательных конденсаторов может быть достигнуто за счет тиристорного управления, когда на конденсаторах возникают большие перенапряжения после аварийных ситуаций. Точно так же конденсаторы можно быстро повторно включить с помощью тиристоров после устранения неисправности.

Принцип работы TCSC

Рассмотрим работу TCSC путем анализа схемы с переменной индуктивностью L , управляемой тиристорами T_1 и T_2 , подключенной параллельно с фиксированным конденсатором C , как показано. Традиционно тиристорные преобразователи описываются с использованием угла зажигания/срабатывания α в качестве управляющей переменной.

Эквивалентный импеданс Z_{eq} этой LC цепи выражается как

$$Z_{eq}(\alpha) = \frac{X_C \cdot X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} = -j \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}. \quad (1)$$

Здесь сопротивление фиксированного конденсатора определяется как $-j(1/\omega C)$. Если $\omega C - (1/\omega L) > 0$, то в цепь станет носить емкостной характер.

Если $\omega C - (1/\omega L) = 0$, возникает явление резонанса напряжений, которое приводит к бесконечному эквивалентному емкостному реактивному сопротивлению, и следственно к значительным перенапряжениям.

Если же $\omega C - (1/\omega L) < 0$, то в цепи начинает преобладать реактивное сопротивление переменной индуктивности. Эта ситуация соответствует индуктивному режиму работы TCSC.

Приведены формы сигналов, связанные с TCSC при работе в установившемся режиме.

При этом интервалы включения тиристоров существенно короче, чем время полупериода сетевой частоты, и они возникают около амплитудных значений кривой тока линии электропередачи.

В TCSC вся конденсаторная батарея или ее часть снабжена параллельными тиристорами, которые передают токовые импульсы, затем они суммируются по фазе с линейным током для повышения напряжения. Каждый тиристор срабатывает один раз за цикл и имеет интервал проводимости, который короче половины цикла номинальной частоты сети [2].

Демпфирование колебаний мощности

Передача мощности P по линии с последовательной компенсацией определяется выражением:

$$P(t) = \frac{U_1 \cdot U_2 \sin \delta}{X_L - X_C(t)} \quad (2)$$

Колебания активной мощности в системах электропередачи могут возникать в линиях связи между генерирующими объектами в результате плохого демпфирования межсистемных соединений, особенно во время передачи большой мощности. Такие колебания могут быть вызваны рядом причин, например, отключением линии, переключением линий или внезапным изменением выходной мощности генератора [2].

В регуляторе демпфирования колебаний мощности POD (Power-Oscillation Damping) входными сигналами являются локальные сигналы в виде активной мощности и напряжения на линии в месте подключения, как это показано. Выходным же сигналом POD-регулятора является сигнал степени компенсации [3].

Контроллер POD состоит из усилительного звена K_p , передаточной функции с постоянной времени T_1 , предназначенной для выделения из сигнала активной мощности переменной составляющей, определяющей локальные колебания, а также фильтров с постоянными времени T_2 – T_4 . Таким образом, контроллер POD генерирует сигнал, пропорциональный колебательной составляющей потока мощности, которая соответствующим образом сдвинута по фазе [4].

Чтобы действие динамического управления POD не превышало регулируемый диапазон TCSC, фильтры снабжены ограничителями компенсационных сигналов $C_{\min}$ и $C_{\max}$. Предел $C_{\max}$ соответствует максимально допустимому напряжению на TCSC, а $C_{\min}$ максимальному импедансу линии электропередачи (индуктивный режим) [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим влияние устройства TCSC с тиристорным управлением, выполняющего роль демпфера колебаний мощности на примере электроэнергетической системы (ЭЭС), представленной.

Здесь, в качестве передающей системы принята первая энергосистема, а вторая энергосистема является приемной. В линию электропередачи включено последовательно устройство TCSC.

С целью получения переходных характеристик будем моделировать внешнее возмущение, выраженное в увеличении перетока мощности в сторону второй энергосистемы, и затем определим набор коэффициентов регулятора TCSC, минимизирующего отклонение фазового угла $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ между двумя ЭЭС.

Исходные и оптимизированные значения параметров POD-регулятора приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров POD-регулятора

Значение	Параметр				
	K_p	$T_1=T_3$	$T_2=T_4$	$C_{\max}$	$C_{\min}$
Исходное	0,7	0.05	0.06	0.1	-0.1

Оптимизированное	2	0.015	0.038	0.1	-0.1
------------------	---	-------	-------	-----	------

Параметры POD-регулятора были определены с помощью параметрической оптимизации, блок-схема которой приведена.

Процедура оптимизации начинается при заранее выбранных начальных значениях параметров POD-регулятора $x_0=x_0$. Затем осуществляется настройка коэффициентов с помощью алгоритма нелинейного программирования, пока целевая функция $f(x)$ не достигнет своего глобального минимума. Параметры, соответствующие этому глобальному минимуму, являются оптимальными для POD-регулятора в смысле минимума целевой функции

$$\min \{f(x) : h(x) = 0, g(x) \geq 0\}, \quad (3)$$

где $f(x)$ – целевая функция; x – вектор, содержащий параметры POD-регулятора; $h(x)$ – ограничения, накладываемые равенствами; $g(x)$ – ограничения, накладываемые неравенствами.

При этом целевая функция задавалась в виде:

$$f(x) = \sum \int_0^{t_1} |\delta_{12}(t, x) - \delta_{12}(0, x)| dt = \int_0^{t_1} \Delta \delta(t, x) dt, \quad (4)$$

где $\delta_{12}(t, x)$ – разность фазных углов в момент времени t двух ЭЭС, имеющих межсистемную связь; $\delta_{12}(0, x)$ – начальная разность фазных углов; $\Delta \delta(t, x)$ – изменение разности фазных углов за время t ; t_1 – время наблюдения.

Процесс оптимизации параметров POD-регулятора проводился в пакете Response Optimization среды MATLAB.

Приведены результаты нелинейного математического моделирования, показывающие значительное улучшение демпфирования колебаний в ЭЭС. По полученным характеристикам переходных процессов 1 и 2 оценим эффективность POD-регулятора по следующим показателям [3]:

- Время задержки (t_3): Время, необходимое для достижения половины установившегося значения.
- Пиковое время (t_n): Время, необходимое для достижения первого пикового значения характеристики переходного процесса.
- Время регулирования (t_p): Время, необходимое для того, чтобы характеристика переходного процесса оставалась в пределах желаемой статической ошибки (5%) от установившегося значения.
- Перерегулирование: Максимальное пиковое значение, относительно установившегося значения.

Таблица 2. Характеристики переходного процесса

Показатели качества переходного процесса	1-я характеристика	2-я характеристика
Время задержки (t_3), сек.	2,3	2,55
Пиковое время (t_n), сек.	3,2	3,8
Время регулирования (t_p), сек.	10,2	9,2
Перерегулирование, %	50	61,5

Из приведенных результатов очевидно, что несмотря на увеличение перерегулирования при использовании POD-регулятора с оптимизированными параметрами, улучшена демпфируемость колебаний, о чем свидетельствует снижение колебательности переходной характеристики 2 и уменьшение времени ее затухания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие колебаний активной мощности ограничивает пропускную способность межсистемных соединений между частями энергосистем. В некоторых случаях возможна установка системных стабилизаторов PSS на генераторы, особенно при межсистемных колебаниях мощности, которые имеют тенденцию быть низкочастотными (обычно от 0,2 Гц до 0,7 Гц). Последовательные конденсаторы с тиристорным управлением TCSC могут использоваться для улучшений характеристик энергосистемы, а именно для повышения запаса устойчивости, демпфирования колебаний мощности, уменьшения подсинхронного резонанса.

Список литературы

1. Misrikhanov M.Sh., Sitnikov V.F., and Sharov Yu.V. Optimal controllers based on FACTS devices intended for decentralized control of integrated large electrical power systems, *Russ. Electr. Eng.*, 2008, vol. 79, no. 2, pp. 104–110.
2. Mohan Mathur R., Rajiv K. Varma Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, 2002, Wiley-IEEE Press, 495 p.
3. Priyanka Kathal, Arti Bhandakkar Power Flow Control in Power System using FACT Device Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC): A Review // *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Volume 2 Issue 3, 2013, PP. 388-395.
4. Wu Y. and Li L., "Transfer capability study of tie-line installed TCSC considering transient stability constraints," *2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference*, Wuhan, China, 2011, pp. 260-263, doi: 10.1109/PEAM.2011.6135078.
5. Allaev K., Makhmudov T. Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems. *Electrical Engineering*, 2020; Issue 1: 309-319. DOI 10.1007/s00202-019-00876-9 *IEEE 7th Power India*