

7-7-2021

MATHEMATICAL MODEL OF POWER FLOW IN A SINGLE-PHASE NETWORK USING FACTS DEVICES CONTAINING STATIC POWER FLOW COMPENSATOR SVC

Sh V. Khamidov

Leading Engineer, CDC "Energiya"

Bahrom Normuratov

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, normuratov.bahrom@mail.ru

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>



Part of the [Mechanical Engineering Commons](#)

Recommended Citation

Khamidov, Sh V. and Normuratov, Bahrom (2021) "MATHEMATICAL MODEL OF POWER FLOW IN A SINGLE-PHASE NETWORK USING FACTS DEVICES CONTAINING STATIC POWER FLOW COMPENSATOR SVC," *Scientific-technical journal*: Vol. 4 : Iss. 3 , Article 8.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol4/iss3/8>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

УДК 621.311

MATHEMATICAL MODEL OF POWER FLOW IN A SINGLE-PHASE NETWORK USING FACTS DEVICES CONTAINING STATIC POWER FLOW COMPENSATOR SVC**¹Khamidov Sh. V., ²Normuratov B. R.**¹Doctor of Technical Sciences, Leading Engineer, CDC “Energiya”²Assistant at the Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКА МОЩНОСТИ В ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТРОЙСТВ FACTS, СОДЕРЖАЩИХ СТАТИЧЕСКИЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ SVC****¹Хамидов Ш. В., ²Нормуратов Б. Р.**¹Доктор технических наук, ведущий инженер КДЦ “Энергия”²Ассистент Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова**СТАТИК РЕАКТИВ ҚУВВАТ КОМПЕНСАТОРИ SVC НИ ЎЗ ИЧИГА ОЛГАН FACTS ҚУРИЛМАЛАРДАН ФОЙДАЛАНГАН ҲОЛДА, БИР ФАЗАЛИ ТАРМОҚДАГИ ҚУВВАТ ОҚИМИНИНГ МАТЕМАТИК МОДЕЛИ****¹Хамидов Ш. В.¹, ²Нормуратов Б. Р.**¹Техника фанлари докториб, бош муҳандис КДЦ “Энергия”²Ассистент, Ислам Каримов номидаги Ташкент давлат техника университети

***Abstract** – The use of FACTS technology makes it possible to reduce the gap between controlled and uncontrolled modes of EPS operation, providing dispatching personnel with additional degrees of freedom in controlling power flows and voltages in excess and deficient areas of the electrical network. The unified approach used as an alternative combines the state variables of the EPS without controlled power equipment and the state variables describing the given controlled power equipment - the FACTS device - into a single set of states. In this case, the electrical network is described in a single coordinate system for the combined iterative solutions using the Newton-Raphson algorithm.*

Key words: FACTS, SVC, STATCOM, power flow, Newton-Raphson method, mathematical model, electric power systems.

***Аннотация:** Применение технологии FACTS позволяет уменьшить разрыв между управляемым и неуправляемым режимами функционирования ЭЭС, представляя диспетчерскому персоналу дополнительные степени свободы при управлении потоками мощности и напряжениями в избыточных и дефицитных областях электрической сети. Использованный в качестве альтернативы унифицированный подход объединяет переменные состояния ЭЭС без управляемого силового оборудования и переменные состояния, описывающие данное управляемое силовое оборудование - устройство FACTS, в единое множество состояний. При этом электрическая сеть описывается в единственной системе координат для объединенных итеративных решений при помощи алгоритма Ньютона-Рафсона.*

Ключевые слова: FACTS, SVC, STATCOM, потока мощности, метода Ньютона-Рафсона, математическая модель, электроэнергетические системы.

***Аннотация** – FACTS технологиясидан фойдаланиши диспетчерлик ходимлариға электр тармоқларида кучланишларни бошқаришида ва қувват оқимлари ортиқча ва этишимайтган жойларда қўшимча чораларни кўриб, ЭЭТ ишлашининг бошқариладиган ва назоратсиз режимлари орасидаги фарқни камайтиришига имкон беради. Шу билан бир қаторда*

MECHANICS

муқобили сифатида қўлланиладиган ёндашув ЭЭТ нинг ўзгарувчан ҳолатини бошқариладиган энергия ускуналари ва ушбу бошқариладиган энергия ускуналари - FACTS қурилмасини тавсифловчи ҳолат ўзгарувчиларини ягона ҳолатлар тўпламига бирлаштиради. Бундай ҳолда, электр тармоғи Ньютон-Рафсон алгоритмидан фойдаланган ҳолда бирлаштирилган такрорий эчимлар учун ягона координаталар тизимида тавсифланади.

Калит сўзлар: FACTS, SVC, STATCOM, қувват оқими, Ньютон-Рафсон усули, математик модел, электр энергетика тизими.

Введение. Методы математического моделирования, используемые для формирования процессов в управляемом силовом оборудовании, можно разделить на две категории [1, 2]: методы последовательного поиска решений; методы одновременного поиска решений.

Последовательный подход выгоден с точки зрения управления реализацией алгоритмов Ньютона-Рафсона. Однако его главный недостаток заключается в том, что фазы и амплитуды напряжения на шинах узлов являются единственными качественными переменными состояния ЭЭС, вычисляемыми с помощью этого метода. В конце каждой итерации возникает подзадача перераспределения переменных состояния управляемых силовых устройств. В результате таких перераспределений итерационный процесс теряет свойство квадратичной сходимости.

Рассмотрим ключевые аспекты реализации моделирования устройств **FACTS-Flexible Alternative Current Transmission Systems** в контексте алгоритмов расчета потока мощности в ЭЭС, содержащей **SVS (Static Var Compensator)**-компенсатор реактивной мощности, на основе метода Ньютона-Рафсона [3-10], а также унифицированную математическую модель потока мощности в ЭЭС, содержащей статический компенсатор реактивной мощности **SVC**.

Основная часть. В качестве переменных состояния **SVC** выберем шунтирующую реактивную проводимость и угол опережения тиристора. Переменные состояния **SVC** будем объединять в единой системе координат вместе с углами фазовых сдвигов и амплитудами напряжения в сети. В линейном диапазоне вольтамперная характеристика возможности по компенсации мощности статическими компенсаторами реактивной мощности **STATCOM (Static Synchronous Compensator)** и **SVC**, аналогичны (рис.1). Однако в нелинейном диапазоне **STATCOM** способен осуществлять регулирование выходного тока сверх максимальных диапазонов емкости и индуктивности независимо от напряжения в ЛЭП, в то время как максимально достижимый компенсационный ток **SVC** линейно уменьшается с уменьшением напряжения.

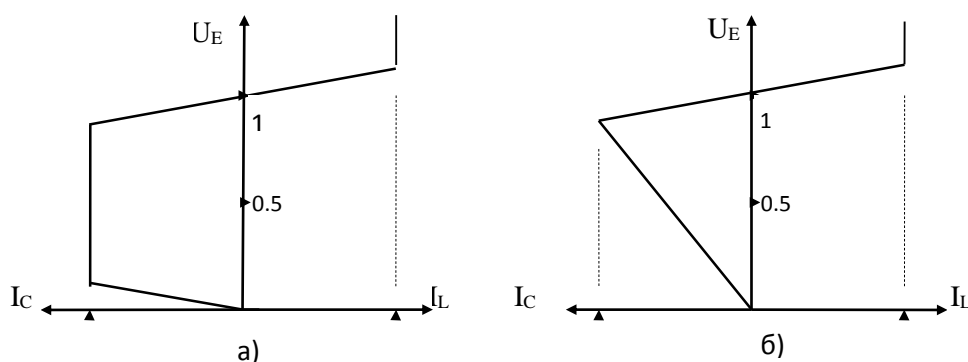


Рис.1. Вольтамперные характеристики STATCOM (а) и SVC (б).

STATCOM является более эффективным по сравнению с **SVC** при решении задачи стабилизации напряжения в условиях действия больших возмущений, во время которых отклонения напряжения могут находиться далеко за пределами линейного диапазона работы компенсатора.

MECHANICS

При проведении расчетов потоков мощности, представим SVC схемой замещения, приведенной на рис.2, в виде шунтирующего регулируемого реактивного сопротивления с ограничением либо угла опережения, либо собственно реактивного сопротивления [1].

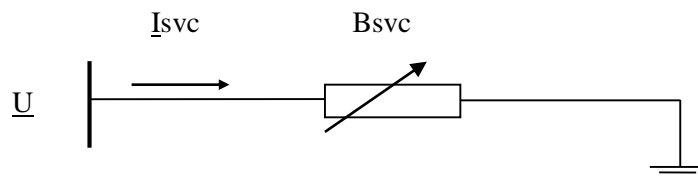


Рис. 2. Схема замещения статического компенсатора реактивной мощности SVC.

Воспользуемся для вывода нелинейных уравнений потока мощности и линеаризованных уравнений, необходимых для реализации метода Ньютона-Рафсона, следующей схемой замещения SVC [1]:

Ток, протекающий через статический компенсатор реактивной мощности, равен:

$$I_{svc} = -B_{svc}U \quad (1)$$

Уравнения для мощностей ΔP и ΔQ раскрываются вокруг опорной траектории $(\delta^{(0)}, U^{(0)})$, при этом алгоритм Ньютона-Рафсона имеет следующее матричное представление:

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}^{(i)} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta U}{U} \end{pmatrix}^{(i)} \quad (2)$$

Реактивная мощность, передаваемая SVC в сеть, определяется формулой

$$Q_{svc} = -B_{svc}U^2 \quad (3)$$

Линеаризация уравнений в окрестности установившегося режима ЭЭС и применение формулы (2) к формуле (3) приводят к матричному итерированному уравнению

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}^{(i)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q \end{pmatrix}^{(i)} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta B_{svc}}{B_{svc}} \end{pmatrix}^{(i)}, \quad (4)$$

где эквивалентная реактивная проводимость входит в переменную состояния – вектор правой части уравнения. При этом в силу нулевых элементов матрицы размера 2×2 матричное уравнение распадается на два независимых скалярных уравнения

$$\Delta P^{(i)} = 0; \quad \Delta Q^{(i)} = Q \left(\frac{\Delta B_{svc}}{B_{svc}} \right)^{(i)} \quad (5)$$

В конце каждой i -й итерации шунтирующая переменная реактивная проводимость должна обновляться согласно выражению

$$B_{svc}^{(i)} = B_{svc}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta B_{svc}}{B_{svc}} \right)^{(i)} B_{svc}^{(i-1)}. \quad (6)$$

Изменяющаяся реактивная проводимость представляет собой общую реактивную проводимость SVC, требуемую для сохранения заданного значения амплитуды напряжения в сети. После вычисления уровня компенсации можно рассчитать угол опережения тиристора. Тем не менее, дополнительный расчет также требует итеративного решения, так как реактивная проводимость SVC и угол опережения тиристора связаны нелинейной зависимостью.

Альтернативный подход, позволяющий избежать дополнительных итераций при расчетах, рассматривает угол опережения реактора с тиристорным управлением при формировании потока мощности как переменную состояния. Пусть переменная обозначает угол опережения, тогда искомая реактивная мощность описывается уравнением [1, 2]:

MECHANICS

$$Q = -\frac{U^2}{x_L x_C} \left[x_L - \frac{x_C}{\pi} (2(\pi - \beta_{SVC}) + \sin \beta_{SVC}) \right], \quad (7)$$

где x_L, x_C - индуктивное и емкостное эквивалентное сопротивление SVC.

Из последнего уравнения можно перейти к матричному линейаризованному итерированному уравнению

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}^{(i)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2U^2}{\pi x_L} (\sin(2\beta_{SVC}) - 1) \end{pmatrix}^{(i)} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \beta_{SVC} \end{pmatrix}^{(i)}, \quad (8)$$

а точнее - к изолированным скалярным уравнениям

$$\Delta P = 0; \quad \Delta Q^{(i)} = \frac{2U^2}{\pi x_L} (\sin(2\beta_{SVC}) - 1) \Delta \beta_{SVC}^{(i)}, \quad (9)$$

где в конце каждой i -й итерации угол опережения β_{SVC} до достижения требуемой точности обновляется согласно соотношению

$$\beta_{SVC}^{(i)} = \beta_{SVC}^{(i-1)} + \Delta \beta_{SVC}^{(i)}. \quad (10)$$

Рассмотрим далее модель использования угла опережения SVC, когда схема замещения устройства FACTS дополнена так, что она в явном виде включает понижающий трансформатор. В этом случае формируется единая модель, дающая возможность непосредственного управления амплитудой напряжения на высоковольтной части трансформатора без нарушения характеристик квадратичной сходимости метода Ньютона-Рафсона.

Общая полная проводимость Y_{T-SVC} комбинации «статический компенсатор реактивной мощности – трансформатор» состоит из последовательной комбинации полных проводимостей трансформатора Y_T и статического компенсатора Y_{SVC} (рис. 3).

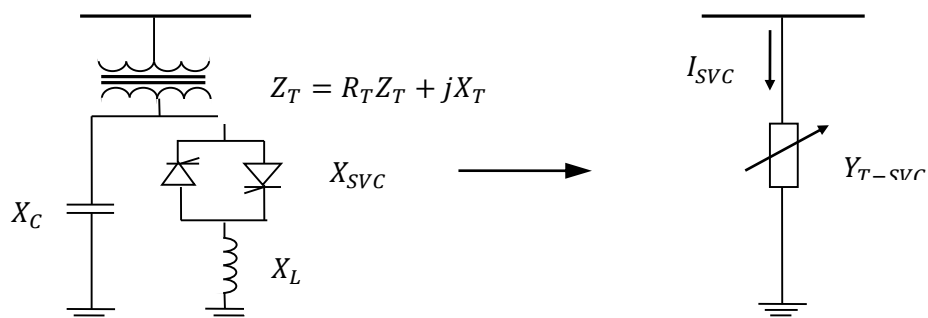


Рис. 3. Схемы замещения SVC и понижающего трансформатора

Проводимость комбинированного шунтирующего компенсатора определяется как

$$Y_{T-SVC} = G_{T-SVC} + jB_{T-SVC}, \quad (11)$$

где

$$G_{T-SVC} = \frac{R_T}{R_T^2 + X_{\text{экв}}^2}; \quad B_{T-SVC} = \frac{X_{\text{экв}}}{R_T^2 + X_{\text{экв}}^2}; \quad X_{\text{экв}} = X_T + X_{SVC};$$

$$X_{SVC} = \frac{X_C X_{TCR}}{X_C - X_{TCR}}; \quad X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \beta_{SVC}) + \sin(2\beta_{SVC})},$$

X_{TCR} - сопротивление реактора с тиристорным управлением TCR.

Линеаризованные итерированные уравнения потока мощности определяются выражением

MECHANICS

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}^{(i)} = \begin{pmatrix} 0 & U^2 \frac{\partial G_{T-SVC}}{\partial \beta_{SVC}} \\ 0 & -U^2 \frac{\partial B_{T-SVC}}{\partial \beta_{SVC}} \end{pmatrix}^{(i)} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \beta_{SVC} \end{pmatrix}^{(i)} \quad (12)$$

Здесь $\frac{\partial B_{T-SVC}}{\partial \beta_{SVC}} = -\frac{1}{D^2} (-D \frac{\partial X_{SVC}}{\partial \beta_{SVC}} + X_{\text{экв}} \frac{\partial D}{\partial \beta_{SVC}})$; $\frac{\partial G_{T-SVC}}{\partial \beta_{SVC}} = \frac{R_T}{D^2} \frac{\partial D}{\partial \beta_{SVC}}$;

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial \beta_{SVC}} &= 2X_{\text{экв}} \frac{\partial X_{SVC}}{\partial \beta_{SVC}} \\ \frac{\partial X_{SVC}}{\partial \beta_{SVC}} &= \frac{2X_{SVC}^2}{\pi X_L} (1 - \cos(2\beta_{SVC})); \\ D &= R_T^2 + X_{\text{экв}}^2 \end{aligned}$$

В конце каждой i -й итерации угол опережения обновляется согласно выражению

$$\begin{aligned} \beta_{\text{оп}}^{(i)} &= \beta_{SVC}^{(i-1)} + \Delta \beta_{SVC}^{(i)} \\ Q_{SVC}^{\text{оп}} &= -B_{SVC} U^2. \\ Q_{SVC} &= -B_{SVC} U^2 \end{aligned}$$

до достижения сходимости вычислительного процесса.

Приведенная унифицированная математическая модель расчета потока мощности в электроэнергетической системе со статическим компенсатором реактивной мощности типа SVC, позволяет оценить степень разрыва между управляемым и неуправляемым режимами функционирования электроэнергетической системы [11].

Заключение. Предложенная унифицированная математическая модель расчета потока мощности в электроэнергетической системе с актуальными типами устройств FACTS, позволяет синтезировать типы устройств исходя из их функциональных предназначений и заложенных принципов. Модели потока мощности в однофазной сети при позволяют оценить степень разрыва между управляемым и неуправляемым режимами функционирования электроэнергетической системы.

References

- [1] Texnologiya i ustroystva FACTS: Ucheb. Posobiye / M.Sh.Misrixanov, V.N.Ryabchenko / FBGOVO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I.Lenina. -Ivanovo,2017. 112 - 217 s.
- [2] Anderson, P. Upravleniye energosistemami i ustoychivost / P. Anderoson, A. Fuad. – M.: Energiya, 1980.
- [3] Barinov, V.A. Rejimy energosistem: metody analiza i upravleniya / V.A. Barinov, S.A. Sovalov, - M.: Energoatomizdat, 1990.
- [4] Berkovich, M.A. Osnovy avtomatiki energosistem / M.A. Berkovich, A.N. Komarov, V.A. Semenov. – M.: Energoatomizdat, 1990.
- [5] Venikov V.A. Optimizatsiya rejimov elektrostantsiy i energosistem / V.A.Venikov, V.G. Juravlev, T.A. Filipova. – M.: Energoatomizdat, 1990.
- [6] Venikov V.A. Dalnyie linii elektroperedachi postoyannogo i peremennogo / V.A. Venikov, Yu.P. Rьjov. – M.: Energoatomizdat, 1985.
- [7] Gantmaxer F.R. Teoriya matrits / F.R. Gantmaxer. – M.: Nauka, 1987.
- [8] Darmanchev, A.K. Osnovy operativnogo upravleniya energosistemami / A.K. Darmachev. – L.: Gosenergoizdat, 1960.
- [9] Shukhrat Khamidov, Sunnatilla Tillaev, Bahrom Normuratov. “Improving the reliability of UPS Central Asia implementation of FACTS devices”- Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020).
- [10] Khamidov Sh.V, Normuratov B.R., Pulatov B.M, Kilichov O.G. “Optimization of power flow through FACTS in electrical networks”- “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering”(CONMECHYDRO-2020).