

Изследване ефективността на модел - тестова вятърна система в програмна среда SIMULINK

● ОСНОВНИ ИЗЛОЖЕНИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Методиките за проектиране на Възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) задължително използват компютърно синтезиране на системи и устройства, използвайки съвременни програмни продукти за симулация - „Simulink“.

При алгоритъма за изчисляване на ВЕИ от раздела Енергетика, свързан с вятърните системи, се задава изходната инсталирана електрическа енергия генерирана от вятърна турбина (източник на електрическа енергия) и първичната входяща природна енергия (мощността на вятърният поток). Моделирането на вятърната централа и свързването ѝ към електроенергийната система е тестови метод, който се реализира успешно на практика. При структурирането на модела се задават външните и вътрешните параметри на турбините и се симулира реална вятърна централа.

В процеса на симулация зададените начални условия за скорост и посока на вятъра също и ъгълът на регулиране се променят. Моделът се стартира, като се отчитат и анализират характеристиките на вятърната централа – мощност, въртящ момент и показатели, свързани с ефективността и приложението.

ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Вятърът е един от алтернативните енергоизточници, който практически е неизчерпаем като ресурс (безплатен) и не води до климатични проблеми. От древността са известни конструкции на съоръжения, задвижвани от вятър – платноходи, мелници, помпи и др. Характерното за тях е директното използване на ветровата енергия. Движението на

въздушните маси в приземните слоеве (вятър), се характеризира с голяма променливост по посока и скорост. Силата на атмосферния въздух в естествената му среда е възобновяемата енергия задвижваща вятърните турбини.

- Основните външни параметри на вятърните генератори са средна скорост и плътност на енергийния поток, особеностите на релефа и инфраструктурата на терена;

При измерване характеристиките на вятъра се използват мачти, върху които се монтира съответната калибрирана и международно сертифицирана електронна апаратура. Дистанционната връзка за събиране и обработка на данните използва сертифициран софтуер за анализ оценка на ветровия потенциал.

- Плътност на енергийния поток

За определяне на ветровия потенциал се дефинира понятието плътност на енергийния поток, изчислена във W/m^2 . Плътността дава разполагаемата мощност P на вятъра, пресичащ единица повърхност m^2 .

Кинетичната енергия на вятъра е пропорционална на плътността на въздуха ρ (kg/m^3), т. е. масата му за единица обем (колкото по-тежък е въздухът, толкова повече енергия генерира турбината при постоянна скорост на въздушния поток).

При нормално атмосферно налягане и при температура от $15^{\circ}C$, въздухът тежи около $1,225kg$ за кубичен метър $1m^3$.

- Влияние на атмосферното налягане, температурата и влажността върху параметрите на вятърната енергия.

Данните за температурата, атмосферното налягане и влажността на въздуха имат съществено влияние върху точната оценка на вятърната енергия. Нормалните колебания на температурата и налягането могат да предизвикат вариации до 10% в очакваните стойности за производителност на генераторите. Така например, разлика от $10^{\circ}C$ в температурата ще

генерира разлика от около 4% в плътността на въздуха, и следователно, в реализираните мощности.

Високо над морското равнище (върховете на планините) атмосферното налягане намалява от олекотяването на въздуха поради неговото разреждане. В следствие на това плътността на атмосферата в горните слоеве намалява, което е причина за намаляване като цяло на плътността на ветровата мощност.

Принцип на преобразуване на кинетичната енергия на вятъра в механична и електрическа енергия, при който се използват неговите характеристики.

- Енергиен потенциал на вятъра.

- Класическият израз за изчисляване на кинетичната енергия:

$$E = (1/2).m.V^2 \quad (1)$$

където,

скоростта на вятъра V , m/s

масата на въздуха m , kg

- Дебитът на движещ се обем от въздух $Q = F.V$ с плътност ρ се определя от обдухваната площ F и скоростта V

- Мощност на вятърния поток.

$$P = 1/2. \rho.F.V^3 \quad (2)$$

- ρ е плътността на въздуха (kg/m³)

- V е моментната скорост на вятъра (m/s)

- F е сечение (m²)

Ако площта, перпендикулярна на въздушния поток е F с обемът $Q = F.V$, преминаващ за една секунда, се получава мощността на ветровия поток:

$$1/2. m.V^2 = 1/2. \rho.F.V^3 \quad (3)$$

$$m = \rho.F.V = \rho.Q \quad (4)$$

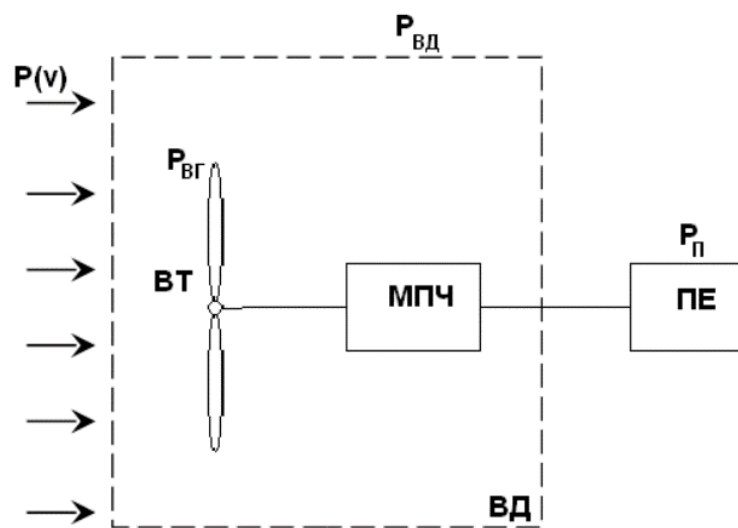
Следователно енергията се изменя пропорционално на куба на скоростта. Само част от тази енергия може да бъде превърната в полезна работа, тъй като част от ветровият поток може да се постави перпендикулярно на атакуваната повърхност.

Енергията на ветровия поток, атакуващ повърхността е:

$$E_0 = 1/2 \cdot F \cdot \rho \cdot V^3 \quad (5)$$

- Коефициентът на използване на ветровата енергия ξ - отношението на извършената работа A от движещата се повърхнина F и енергията на ветровия поток E_0 има максимални стойности до **0,192**.

Блок схема на вятърна система.



Фиг.1. Блокова схема на вятърна система.

Основните компоненти от блоковата схема са следните - ВТ – вятърна турбина, МПЧ -механично преобразуваща част (редуктор и система за изменение ъгъла на перките и защита на конструкцията от поривите на вятъра), ВД - ветродвигател, ПЕ - потребител на енергия;

Характеристики и преходни процеси на елементите от ветрогенераторите.

- Основни параметри на вятърните турбини;

Само част от енергията на вятъра се преобразува в полезна енергия и тя е в загражданата площ на вятърната перка, което определя механичния коефициент на полезно действие к.п.д..

- коефициент на използване на енергията ξ
- коефициента на мощност C_P теоретично е 0,59, а реално е 0,45 – 0,48
- механичната мощност на вала на колелото $P_{\text{мех}}$

$$P_{\text{мех}} = \xi \cdot P_{\text{ВП}} \quad (6)$$

$P_{\text{ВП}}$ – мощността на ветровия поток

- мощността на вятърната турбина изразена чрез скоростта

$$P = \rho \cdot V^3 \cdot F \cdot \xi, \text{ W} \quad (7)$$

- мощността на вятърната турбина изразена чрез диаметъра

$$P = 0,000481 \cdot D^2 \cdot V^3, \text{ kW}$$

- полезната електрическа мощност $P_{\text{ЕЛ}}$

$$P_{\text{ЕЛ}} = \eta_P \cdot \eta_G \cdot P_{\text{мех}} \quad (8)$$

η_P и η_G - к.п.д. на редуктора и генератора

- Въвежда се коефициент к.п.д., отчитащ общите загуби от преобразуване механичната енергия в електрическа.

$$\acute{\alpha} = \xi \cdot \eta_P \cdot \eta_G \quad (9)$$

- коефициент на бързоходност на турбината Z , който е отношението на периферната скорост на турбината, към скоростта на вятъра

$$Z = \omega \cdot R / V \quad (10)$$

ω - ъглова скорост на въртене rad/s;

R – радиус на окръжността описана от лопатките на турбината m;

V – линейна скорост на вятъра на входа на турбината при засмукване m/s;

V_0 - линейна скорост на изхода на турбината при изхвърляне m/s;

$$V_0 = \omega \cdot R;$$

- **Анализ:**

Максималното използване енергията на ветровия поток е възможно при изменение на скоростта му, ъгъла на атака на лопатките или честотата на въртене на турбината.

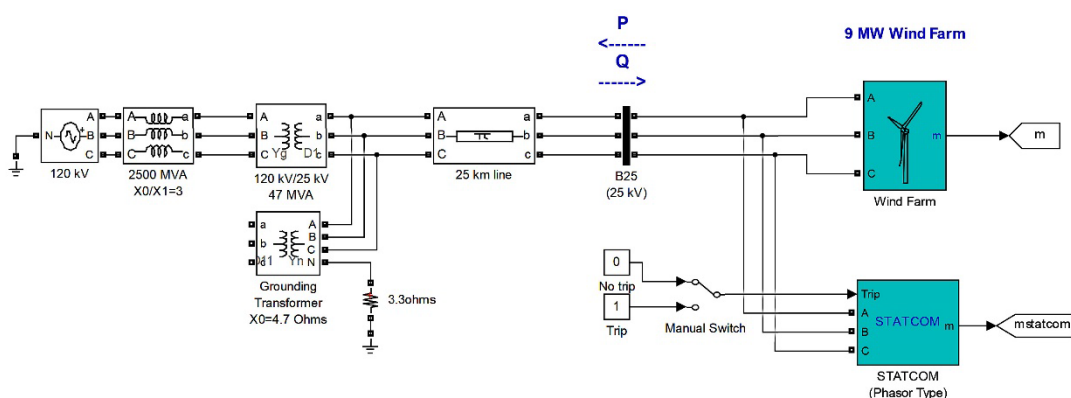
При скорости по-малки от разчетената следва честотата на въртене на турбината да се увеличава пропорционално на скоростта на вятъра до достигане на номинални стойности.

При високи скорости водещи до опасност за конструкцията на турбината, се регулира ъгъла на лопатките в посока намаляване честотата на въртене, с което се избягва механично и електрическо претоварване

СИНТЕЗ НА ТЕСТОВАТА ПОСТАНОВКА

- **Моделиране на вятърна централа изградена от 6 броя вятърни турбини със синхронни генератори „Wind Farm (IG)“ в програмна среда Simulink.**

Тестовият модел показан на фиг.2 представлява енергийна структура на вятърна централа свързана чрез модели на разпределителна система средно напрежение 25kV (вятърна централа) и преносна мрежа за високо напрежение 120kV (синусоиден генератор).



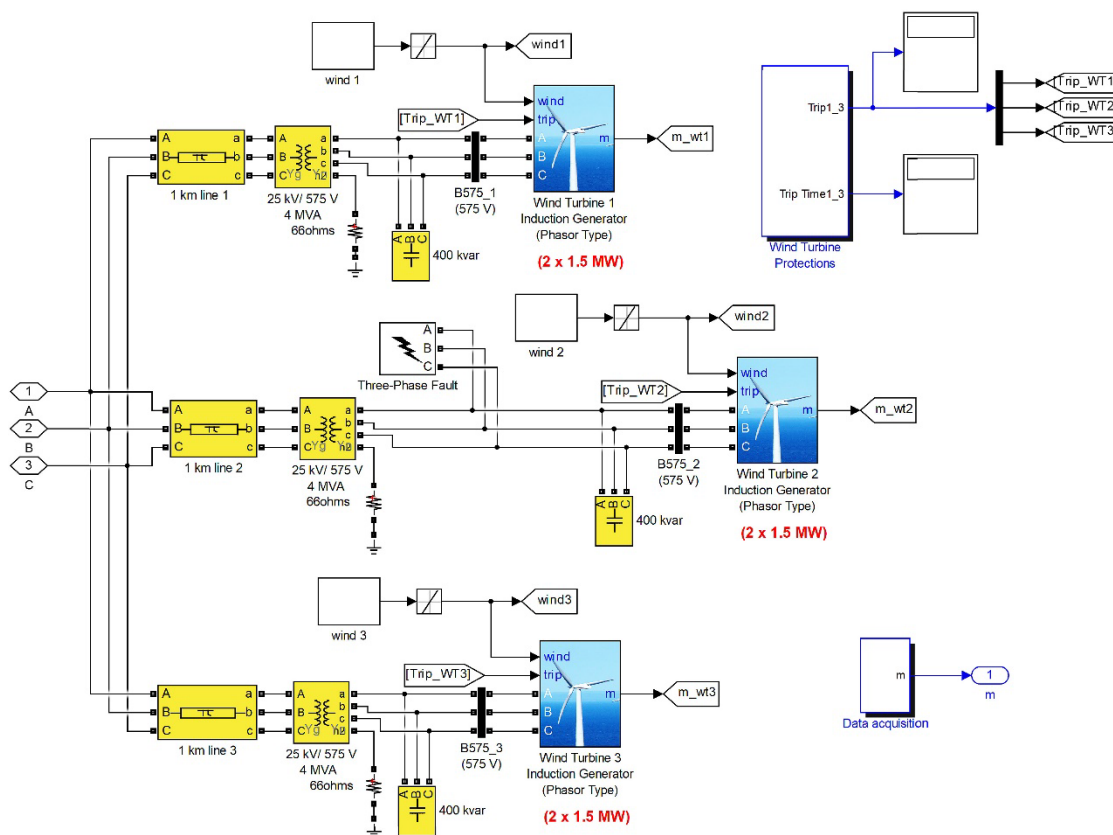
Фиг.2. Тестови модел на енергийната структура – вятърна централа в паралел с електрическа мрежа.

Тестовият модел от подсистемата вятърна централа (Wind Farm) на фиг.2 е симулиран с общ изход на трифазно променливо напрежение с изводи (A, B, C). Електроенергията от блок - Wind Farm по 25km линия достига до повишаващ силов трифазен трансформатор с параметри 120kV/25kV/47MW.

За съгласуване по импеданс на източниците от двете страни се моделират блокове 2500 MVA $X_0/X_1=3$ и Grounding Transformer $X_0=4.7$ Ohmsc.

Подсистемата Wind Farm е показана на фиг.3. със синтезирани три двойки вятърни турбини, като всяка генерира по 1,5 MW активна мощност.

Вятърната електроцентрала е моделирана за добив на енергия от вятъра с обща номинална мощност от 9MW. Всяка вятърна турбина от трите двойки е симулирана да задвижва трифазен синхронен индукционен генератор (IG) на фиг.3.



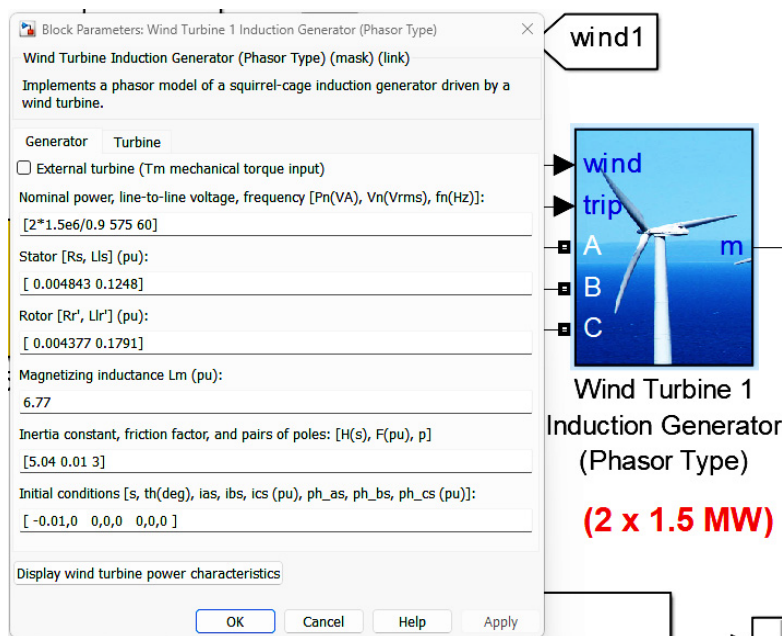
Фиг.3. Тестови модел на подсистемата „Wind Farm“.

Законът на електромагнитната индукция приложен в тестовия модел определя завъртането ротора на синхронния генератор, който е възбуден за индуциране в статорната намотка на е.д.н. Завъртането на ротора от силата вятъра генерира активна мощност (P) към електроенергийната система със зададена мрежова честота.

Генераторите от тестовия модел създават активна мощност (P), само когато роторите им се въртят със синхронна честота и малко над нея. В тестовия модел честотата на въртене при номинално натоварване е стабилна в относителни единици 1pu, като на празен ход тя достига до 1,005pu.

• Компоненти моделиращи подсистемата „Wind Farm“.

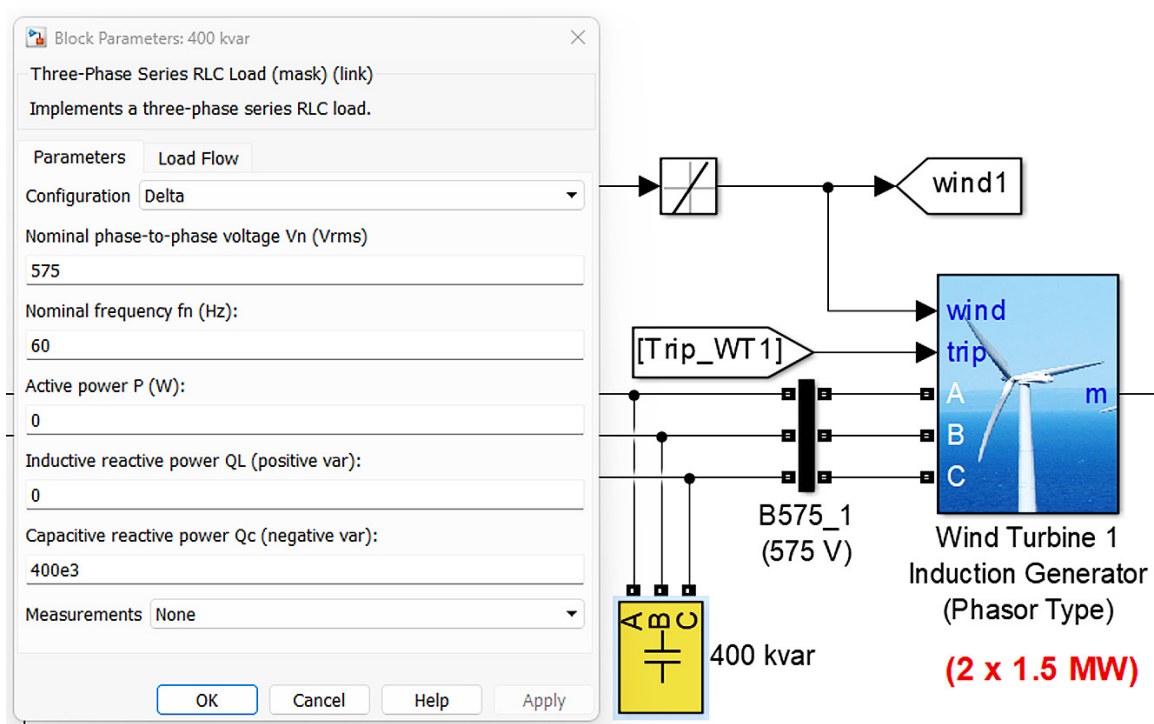
Роторът на синхронният генератор се задвижва от силата на вятъра с променлива стъпка, чрез контролиране ъгълът на завъртане на перките. По този начин при ветрове над 9m/s за конкретния модел се ограничава изходната мощност на генератора до достигане на номиналната му стойност.



Фиг. 4. Диалогов прозорец с параметри моделиращи електрическите характеристики на една двойка вятърни турбини;

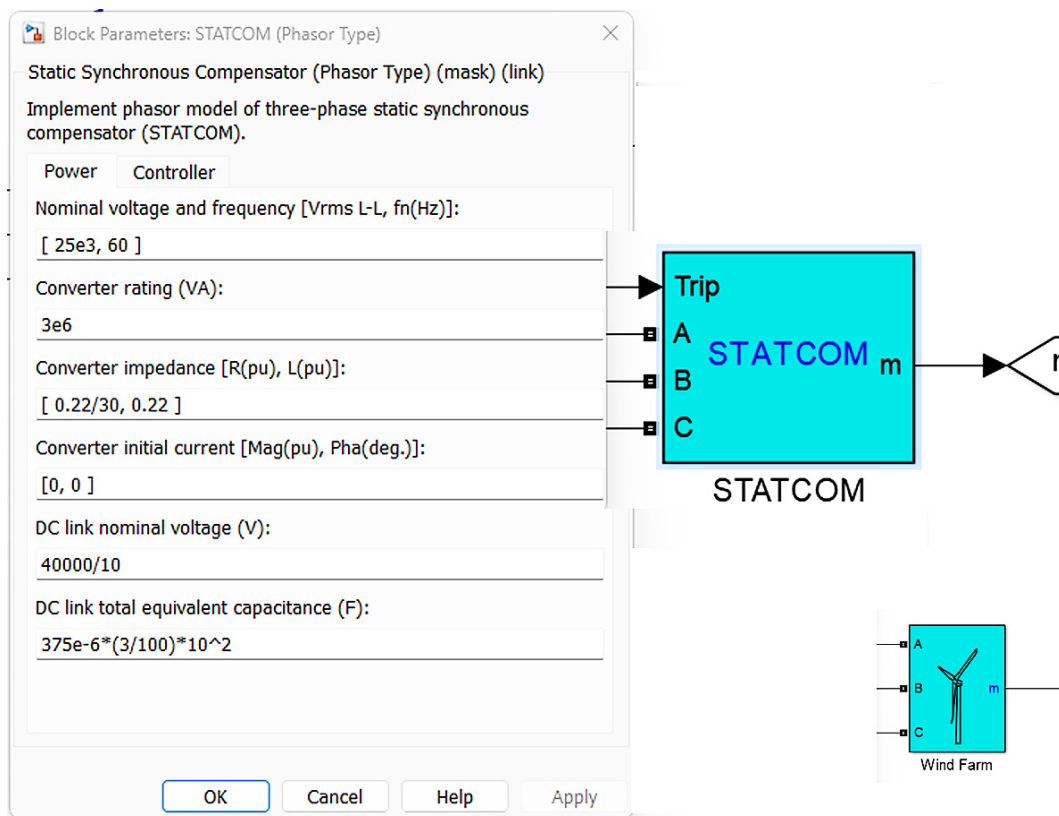
На фиг. 4 са зададени в диалоговият прозорец номиналните електрически параметри на генератора при номинална честота на въртене на турбината.

Консумираната от синхронният генератор IG реактивната мощност Q се компенсира частично от модели на кондензаторни батерии показани на фиг.5. Те са свързани към всяка шина за ниско напрежение (400kVAR за всяка двойка турбина с обща мощност 3MW).



Фиг. 5. Диалогов прозорец със зададени параметри на кондензаторната батерия свързана към едната двойка вятърни турбини;

Другият компенсатор е системата Static Synchronous Compensator „STATCOM“ със зададени параметри в диалоговия прозорец от фиг.6. Тя управлява компенсирането с реактивна мощност Q и се прилага на разпределителни шини B25 за напрежение от 25kV в относителни единици 1pu, като осигурява 3MVAR с 3% понижение.



Фиг. 6. Диалогов прозорец със зададени параметри на трифазен статичен синхронен компенсатор STATCOM моделираща реактивна мощност;

В тестовият модел от фиг.6 е зададена номинална стойност за регулиращо напрежение необходимо за намагнитване на възбудителната намотка на ротора на синхронния генератор, зависещо от честотата на въртене.

Анализ на функциите на Static Synchronous Compensator STATCOM.

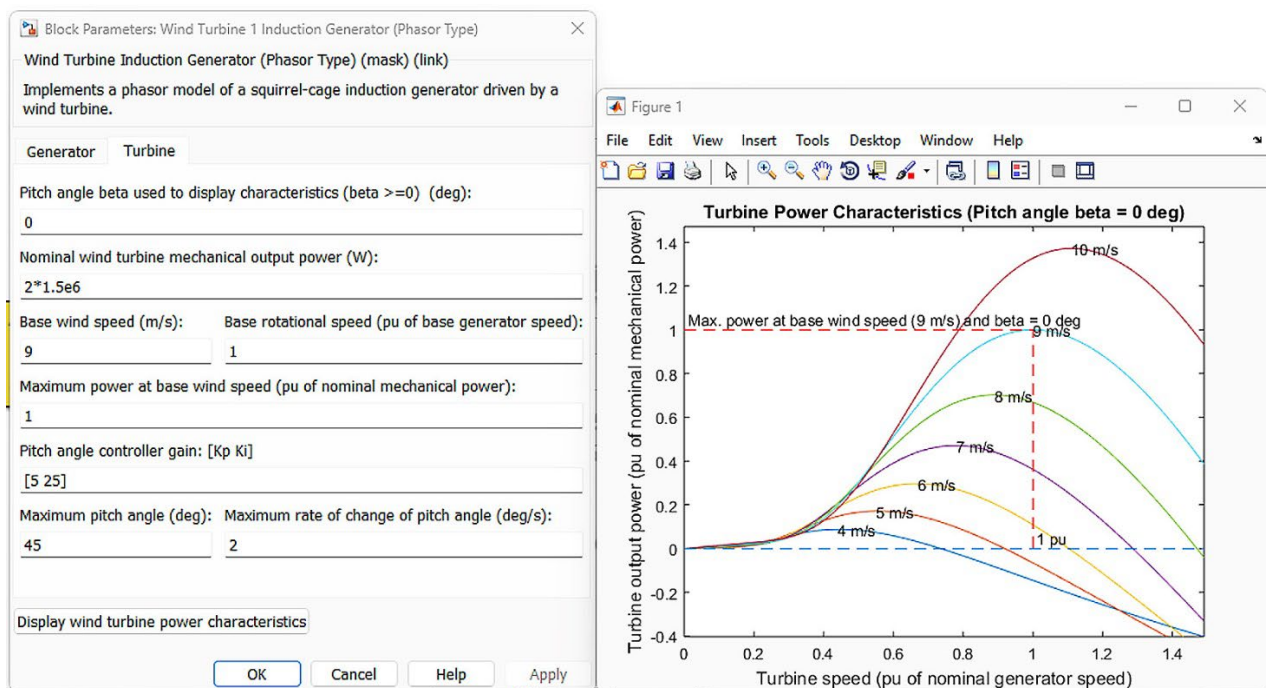
- Компенсаторът STATCOM автоматично превключва при превъзбуждане или недовъзбуждане на възбудителната намотка на ротора, за да отдава или поглъща реактивна мощност. По този начин се подобрява ефективността на обмена на енергия между консуматор и генератор.

- Трифазният статичен синхронен компенсатор STATCOM е предназначен за преходни изследвания стабилността на симулация. В този пример системата се тества през времето от 20s.

- Една от зададените функции в настройките на STATCOM е да намали изходната мощност на синхронния генератор, когато надвиши номиналната му стойност от 3MW. Чрез регулиране ъгълът на наклона на лопатката на турбината от 0° до 8° се стабилизира изходната мощност в номиналните ѝ граници.

• Настройки на тестовите модели за всяка вятърна турбина

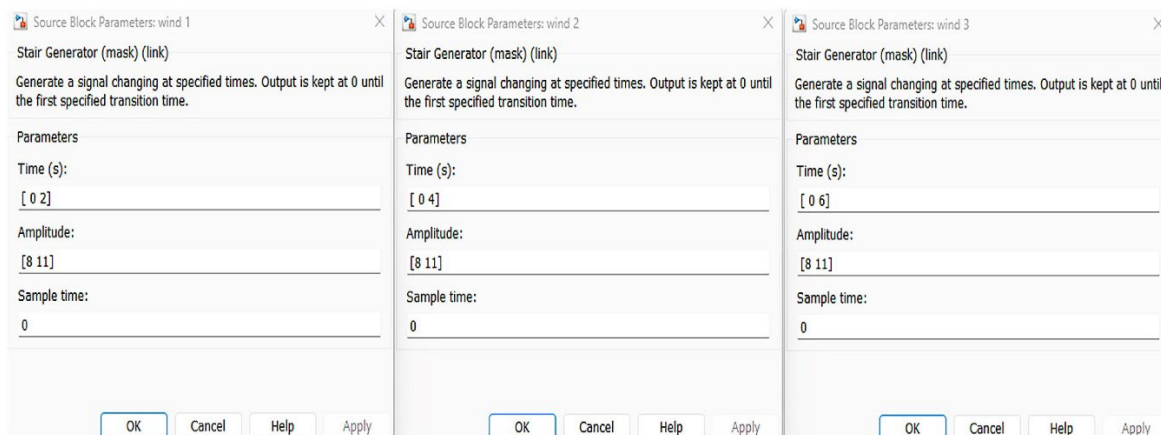
В менютата на диалоговия прозорец от фиг.7. за турбината са въведени параметрите за номинална мощност 2x1,5MW. Чрез кликуване върху радиобутоната от "Данни за турбината" се генерира диаграмата отчитаща характеристиките на мощността от вдясно на фиг.7.



Фиг. 7. Диалогов прозорец с менюта за задаване параметрите на турбина 1 и характеристики на мощността в зависимост от скоростта на вятъра.

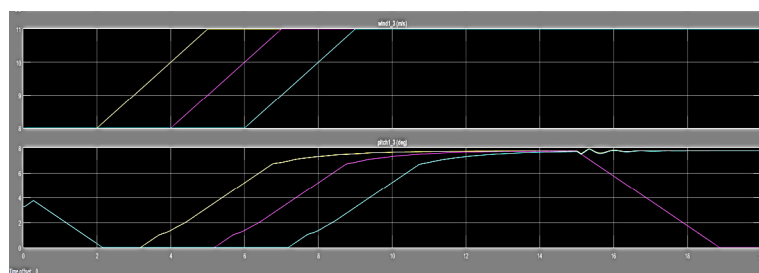
Механичната мощност на турбината като функция на скоростта ѝ се отчита от графиката за скорости на вятъра от 4m/s до 10m/s. Номиналната скорост на вятъра за номиналната механична мощност е 9m/s (1pu = 3 MW).

- **Симулация скоростта на вятъра задвижващ трите двойки модели на турбини.**



Фиг. 8. Диалогов прозорец с менюта за задаване скоростите на вятърните турбини;

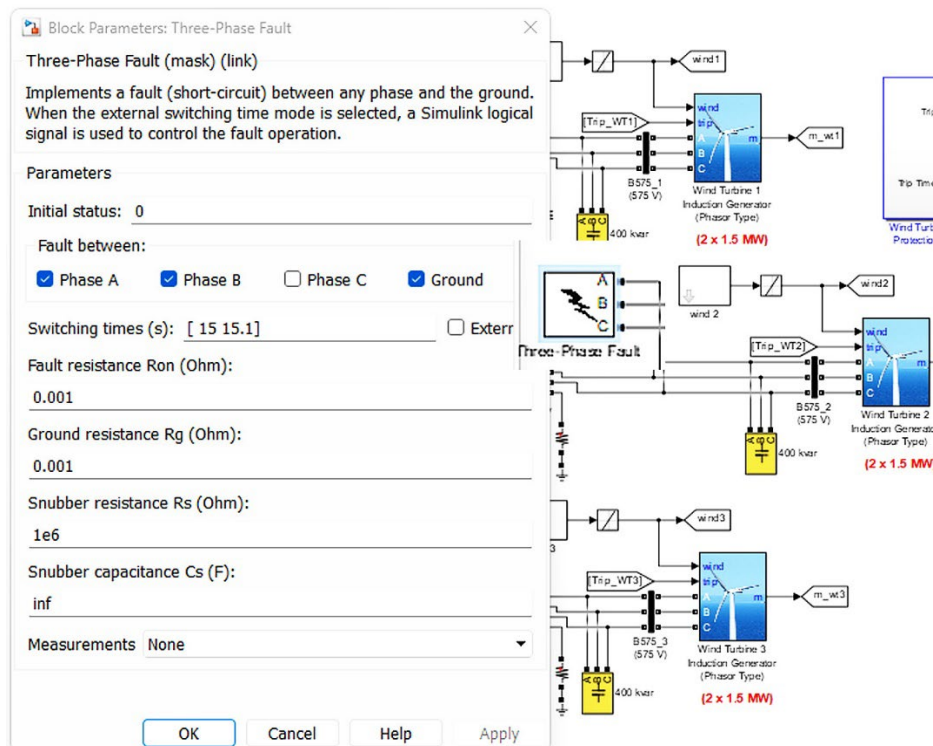
Моделирането на скоростта и времето на вятъра действащ върху турбините се програмира в блоковете от "Вятър 1" до "Вятър 3" показано на фиг.8. Началната скорост на вятъра за турбина 1 се задава 8m/s като след време от 2s се усилва до 11m/s. Нарастването скоростта на вятъра се прилага към турбина 2 на 4-та секунди и към турбина 3, съответно за 6-та секунда показано на диаграмата от фиг. 9.



Фиг.9. Графика от тестовата симулация от въздействието на вятъра върху вятърните турбини за време и скорост.

- **Моделиране на аварийен режим от линейно късо съединение (к.с.) между фаза А и фаза В.**

Задава се тестова симулация за турбина 2 на авария в изходните клеми за ниско напрежение B25 575V в момент от време на 15s с настройка в блок Three-Phase Fault от фиг.10.

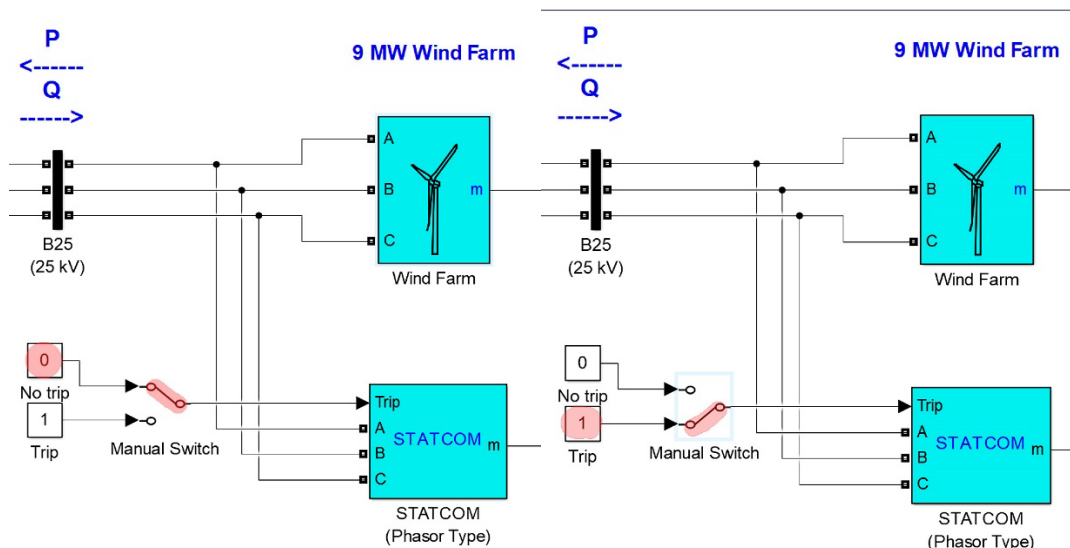


Фиг.10. Диалогов прозорец в блок Three - Phase Fault със зададени параметрите за аварийен режим при турбина 2.

От отвореният диалогов прозорец на фиг.10 се вижда, че аварийния режим се изключва в момент от време $t = 15,11\text{s}$. Тестово се симулира късо съединение между фаза А и фаза В към земя, което води до претоварване на генератора от турбина 2 и задействане на защита от STATCOM.

ПРИНЦИП НА ТЕСТОВАТА СИМУЛАЦИЯ

- При симулирането на вятърната централа се задават два режима за съвместната работа на трите двойки вятърни турбини.
- При първият тестови режим към вятърната централа се включва и изключва към трифазната електрическа мрежа статичния компенсатор STATCOM показано на фиг.11. Това се изпълнява посредством модел на прекъсвач (блок Manual Switch), свързан към входа на Trip управляващ STATCOM.



Фиг.11. Реализиране на логическите „0“ вляво и логическа „1“ вдясно през комутацията с блок Manual Switch, управляващ през входа на Trip вкл/изкл на STATCOM.

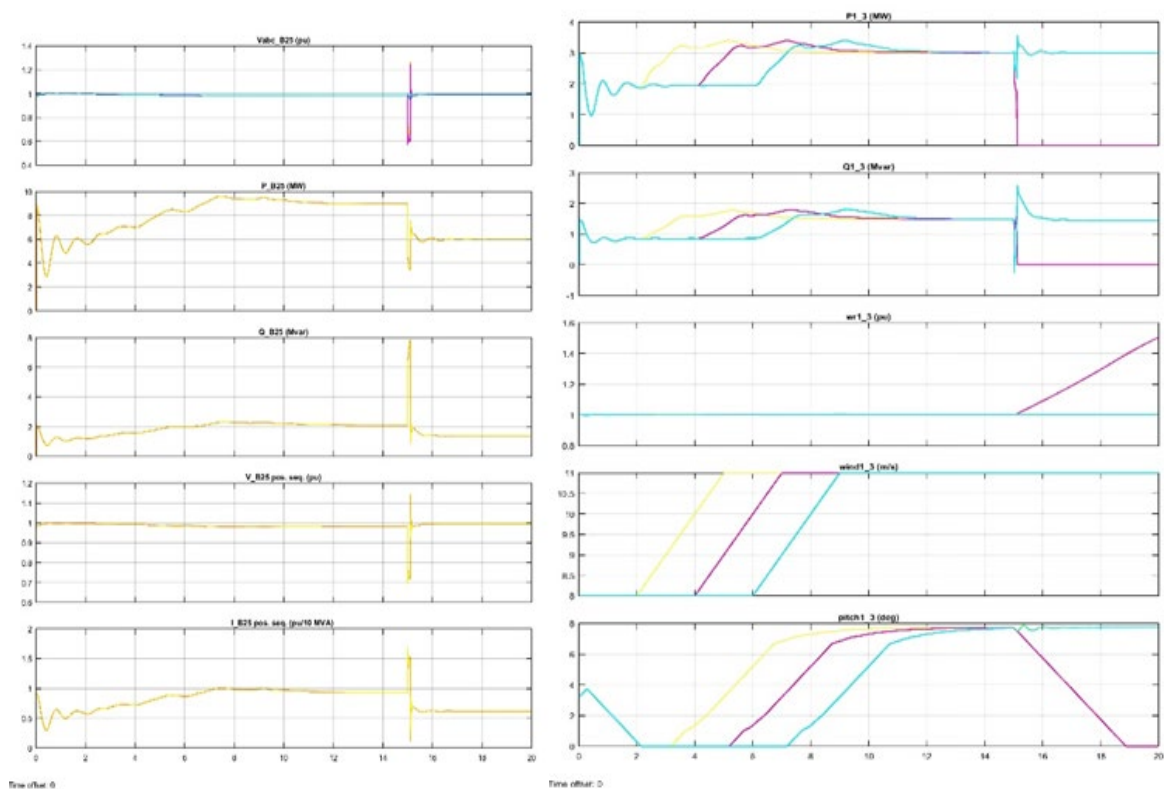
Комутацията се изпълнява чрез двукратно кликуване в работното поле на модела на прекъсвача (блок Manual Switch) (фиг.11). Когато прекъсвачателят е в позиция логическа „0“ вляво трифазния статичен синхронен компенсатор работи в паралел с електрическата мрежа, стабилизиращ номиналните параметри зададени в тестовия модел.

- При вторият тестови режим работата на вятърната централа се тества като STATCOM е изключен т.е. когато прекъсвачателя от блок Manual Switch е в позиция на логическа „1“ вдясно на фиг.11.

- **Стартиране на двата тестови режима, визуализиране и анализиране на резултатите от графиките.**

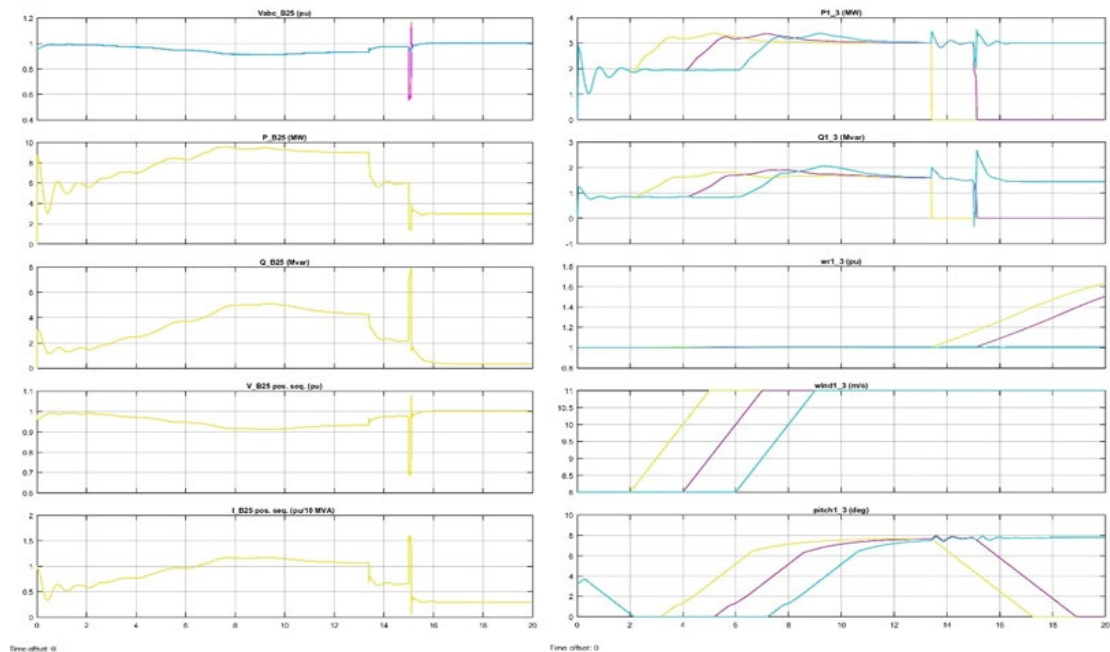
- Симулация на тестовата вятърна централа зададена при работа в **аварийен режим на линейно късо съединение (к.с.)** на генератора от втора турбина на вятърната централа.

- Графики в позиция на логическа „0“ чрез блок Manual Switch, свързан към входа Trip на статичен синхронен компенсатор STATCOM.



Фиг.12. Визуализиране на данните в графична форма с включен STATCOM при аварийен режим на к.с. за турбина 2.

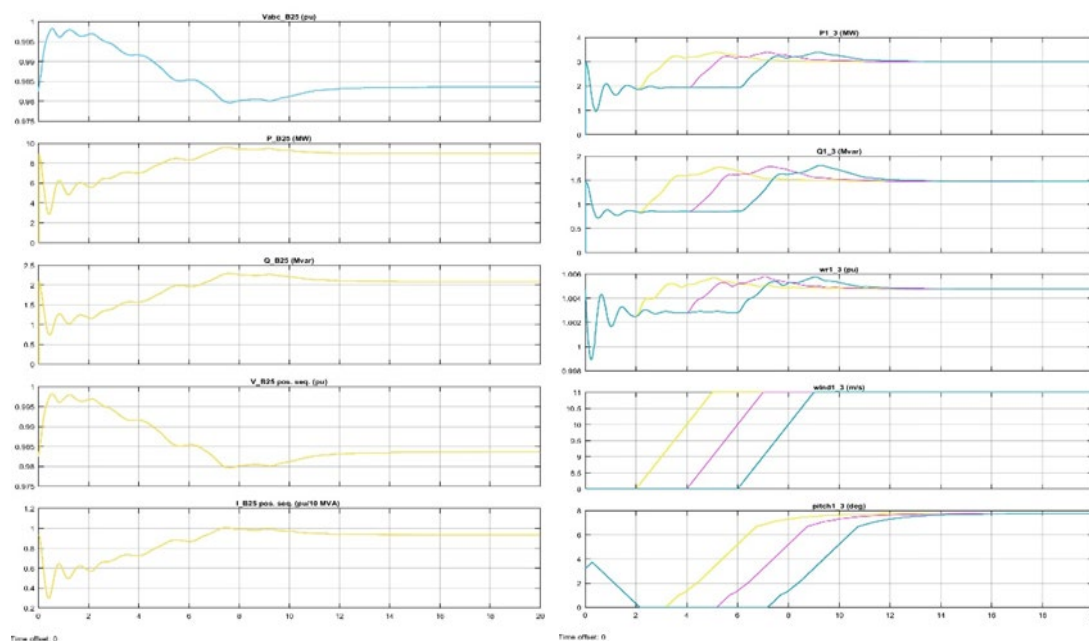
- Графики при позиция на логическа „1“ на ключа Manual Switch;



Фиг.13. Визуализиране на данните в графична форма с изключен STATCOM при аварийен режим на к.с. за турбина 2.

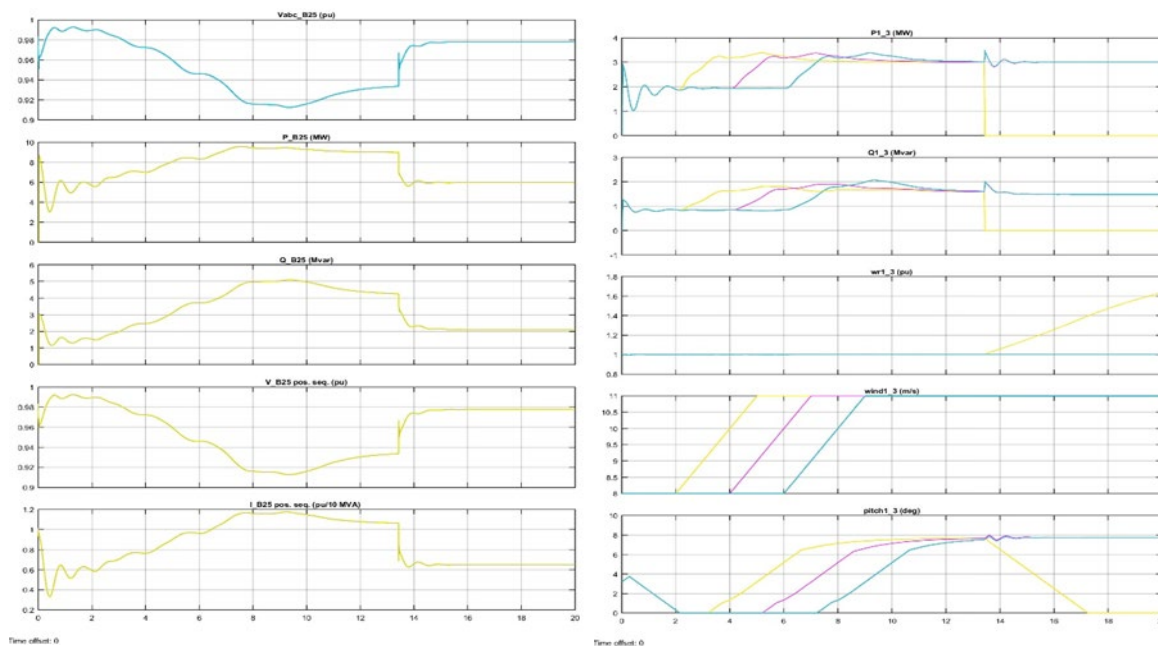
- Симулация на тестовата вятърна централа при работа в **нормален режим** на генератора от втора турбина на вятърната централа.

- Графики в позиция на логическа „0“ чрез блок Manual Switch, свързан към входа Trip на статичен синхронен компенсатор STATCOM.



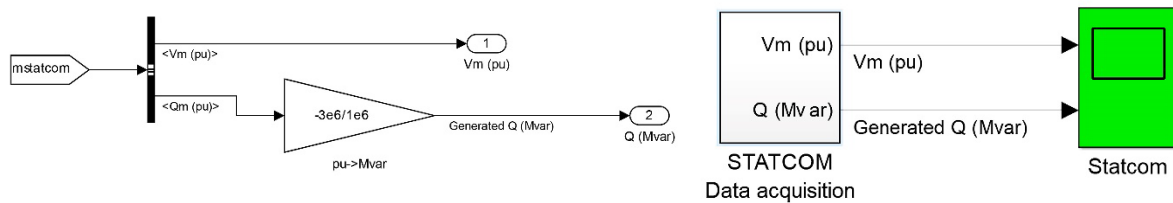
Фиг.14. Визуализиране с включен STATCOM.

- Графики в позиция на логическа „1“ на ключа Manual Switch;



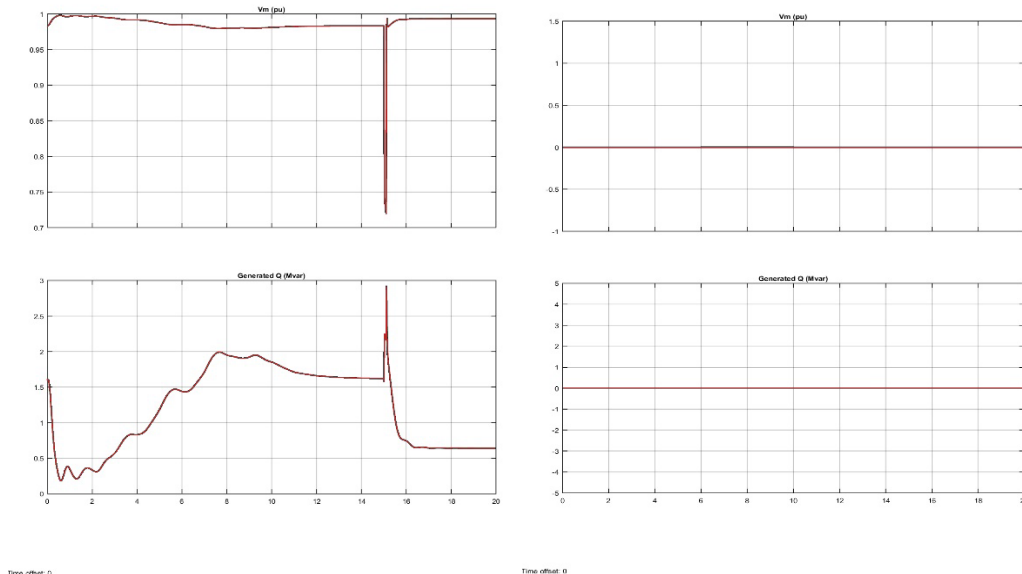
Фиг.15. Визуализиране с изключен STATCOM.

- Мнемосхемата от фиг.16. е на компонентите измерващи параметрите на изменение от въздействието на STATCOM при стартиране на тестовата симулация

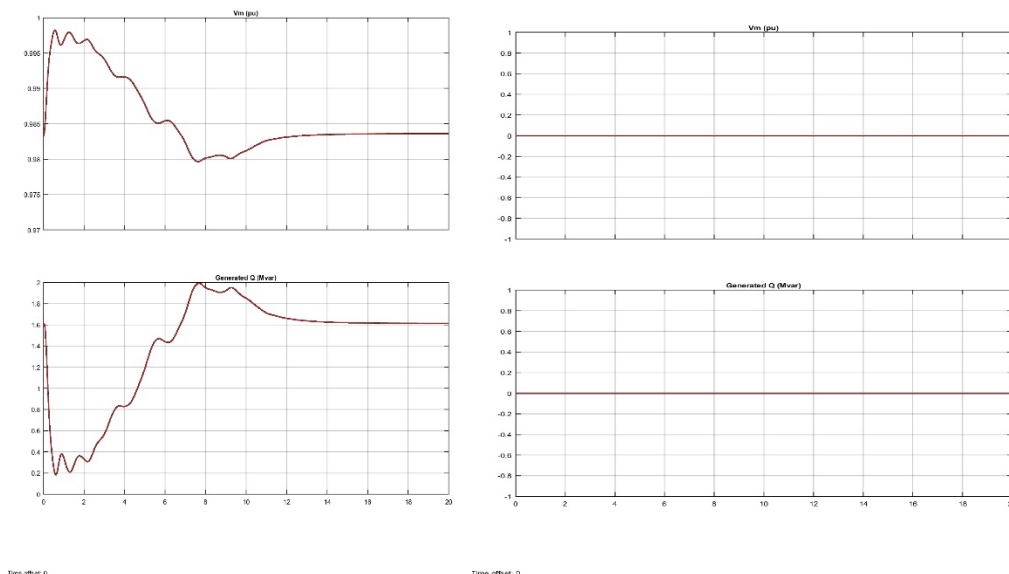


Фиг.16. Математически модел (вляво) блокове отчитащи принципа на действие на STATCOM.

- Времедиаграмите от фиг.17 и фиг. 18 са на виртуалния осцилоскоп от фиг.16. Те отчитат реакцията на STATCOM в режим на к.с. и при нормална работа на вятърните турбини.



Фиг.17. Графично представяне на данните от измерване при включен-
вляво и изключен –вдясно STATCOM в режим на к.с.



Фиг.18. Графично представяне на данните от измерване при включен-
вляво и изключен –вдясно STATCOM в нормален режим.

- **Анализ на графичните резултати получени при тестовото моделиране на вятърната централа.**

- При аварийен режим на к.с. за турбина 2 на фиг. 12 и фиг.13.

Графиките на параметри за турбина 2 в лилав цвят се различават в момента на авария през времето от 14 до 16 секунда. Отчита се промяна на ъгъла на периферния ръб на лопатките при надвишаване на максималната мощност от 3MW поради режима на претоварване. През времето на к.с. пропаданията на диаграмите без включен компенсатор са по-големи, което показва ефективността от неговото добавяне.

- При нормални режими на турбините на фиг. 14 и фиг.15.

Графичните данни се припокриват при работата на турбините с разликата, че турбина 1 (жълт цвят) без включен STATCOM фиг.15 след достигане на максимална мощност променя периферната скорост на лопатките с цел намаляване честотата на въртене. Отчита се от графиките и пропадане на реактивната и активна мощности за турбина1 (жълт цвят)и като цяло се влошава производителността на вятърната централа.

Извод: Резултатът от моделирането показва ефективността от използване на тестовия метод с включения статичен синхронен компенсатор STATCOM, който подобрява к.п.д. на вятърната централа.