УДК 621

# ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

**Акад. НАН Азербайджана, докт. техн. наук, проф. ГАШИМОВ А. М.[1)], докт. техн. наук, проф. РАХМАНОВ Н. Р., канд. техн. наук АХМЕДОВА С. Т.**

*[1)]Институт физики НАН Азербайджана,*
*[2)]Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики*

За последние 10–15 лет совершенствование технологии альтернативной энергетики (и в особенности повышение эффективности солнечных *PV*-преобразователей (solar *PV* modules) и ветроэнергоустановок) способствовало развитию распределительных электрических сетей и созданию систем распределенной генерации (РГ) со смешанным составом – традиционные и возобновляемые источники [1, 2]. Важной особенностью гибридных систем РГ является существенное отличие характеристик и режимов ее источников от характеристик традиционных источников энергосистемы. Это отличие состоит в том, что такие возобновляемые источники, как ветроагрегаты и солнечные *PV*-установки из-за неопределенности и прерывистости характеристик скорости ветра, уровня солнечной радиации, окружающей температуры имеют случайный, неопределенный характер выработки мощности. В связи с этим при росте мощности возобновляемых источников возникает необходимость проведения комплекса исследований, связанных с оценкой их влияния на систему в установившихся и переходных режимах.

Эти исследования дали основание считать системы РГ активными [3]. Вместе с тем для каждой энергосистемы в зависимости от структуры генерирующей мощности, наличия межсистемных связей, возможностей устройств регулирования режима (частоты, мощности, напряжения) требуется проведение более глубоких исследований процессов, возникающих от наличия в системе РГ с возобновляемыми источниками.

**Типовая схема и модель гибридной системы *DG* с возобновляемыми источниками.** Однолинейная схема гибридной (типичной) системы РГ в составе традиционного источника (дизель-генератора) и возобновляемых источников (ветростанции и солнечной *PV*-системы) показана на рис. 1.

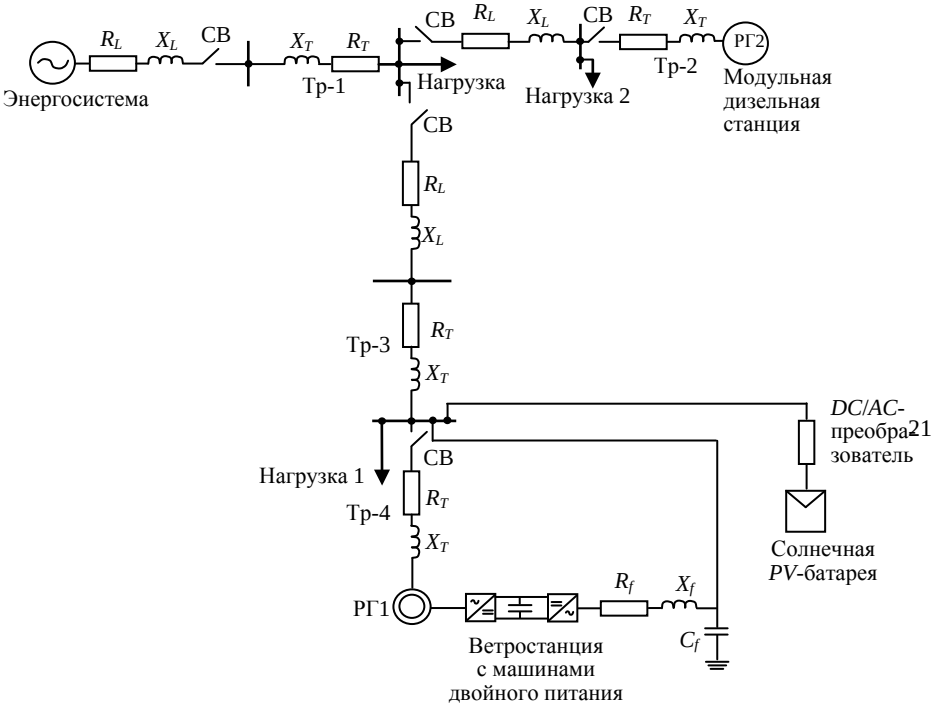

*Рис. 1.* Схема гибридной системы *DG* с возобновляемыми источниками

В схеме *PV*-система подсоединена к общей точке подключения (PCC) через инвертор *DC*/*AC*. Агрегаты ветростанции, представляющие собой ветротурбину с асинхронными генераторами двойного питания, также связаны с PCC. Агрегаты *PV* и *WTG* могут работать на максимум графика мощности или в режимах вне максимума. Величины изменения скорости ветра и солнечной радиации используются в модулях *WTG* и *PV* с целью моделирования выработки мощности этими источниками в системе РГ.

Для расчета и анализа режима в гибридной системе распределенной генерации с возобновляемыми источниками (РГВИ) и оценки ее влияния на переходные процессы в электрической сети энергосистемы составлены динамические модели синхронного дизель-генератора, а также для ветроагрегата с асинхронным генератором двойного питания и солнечных *PV*-комплектов. Имитация режимов в системе РГВИ с моделями указанных источников выполнена в формате программы ETAP-6 [4].

**Моделирование *PV*-источников.** Эквивалентная схема *PV*-панели с подключенной нагрузкой показана на рис. 2. Параметры *PV*-панели приведены в табл. 1.

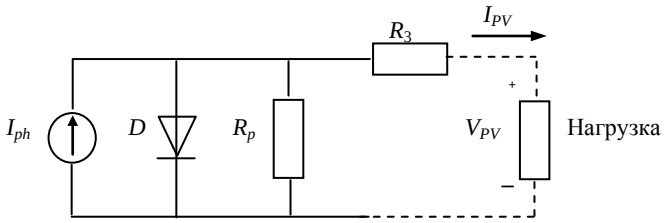


*Рис. 2.* Эквивалентная схема *PV*-панели с подключенной нагрузкой

*Таблица 1*

**Параметры *PV*-панели**

| Обозначение | Описание | Значение |
|---|---|---|
| $V_{OC}$ | Номинальное напряжение открытой цепи | 403 В |
| $I_{PV}$ | Ток *PV*-панели | |
| $I_{Sat}$ | Модуль обратного тока насыщения | |
| $q$ | Заряд электрона | $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| $A$ | Коэффициент идеальности | 1,50 |

| | | |
|---|---|---|
| $K$ | Постоянная Больцмана | $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К |
| $R_S$ | Последовательное сопротивление *PV*-ячейки | |
| $R_P$ | Параллельное сопротивление *PV*-ячейки | |
| $I_{SSO}$ | Ток короткого замыкания (КЗ) | 3,27 А |
| $K_i$ | Температурный коэффициент при токе КЗ | $1{,}7\ e^{-3}$ |
| $T_r$ | Номинальная температура | 301,18 К |
| $I_{rr}$ | Обратный ток насыщения при $T_r$ | $2{,}0793\ e^{-6}$ А |
| $E_{gap}$ | Энергия пробоя силикона | $1{,}1\ eV$ |
| $n_P$ | Число параллельных ячеек | 40 |
| $n_S$ | Число последовательных ячеек | 900 |
| $S$ | Уровень солнечной радиации | 0~1000 Вт/м$^2$ |
| $T$ | Температура на поверхности *PV* | 350 К |

Выдаваемый ток с *PV*-панели определяется из следующих уравнений [5, 6]:

$$I_{PV} = n_P I_{Ph} - n_P I_{Sat}\left[\exp\left(\left(\frac{q}{AkT}\right)\left(\frac{V_{PV}}{n_S} + I_{PV} R_S\right)\right) - 1\right]; \tag{1}$$

$$I_{Ph} = \left(I_{SSO} + k_i\left(T - T_r\right)\right)\frac{S}{1000}; \tag{2}$$

$$I_{Sat} = I_{rr}\left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{qE_{gap}}{kA}\right)\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right). \tag{3}$$

**Моделирование ветроагрегата.** Выходная мощность ветротурбины $P_m$ определяется как

$$P_m = 0{,}5\rho A C_P\left(\lambda, \beta\right) v_m^3, \tag{4}$$

где ρ – плотность воздуха; $A_p$ – ометаемая ротором поверхность; $v_m$ – скорость ветра; $C_P\left(\lambda, \beta\right)$ – коэффициент мощности, который является функцией λ (относительной скорости) и β (угла разворота лопастей (угол тандажа)) ротора.

Уравнения динамики напряжений и токов асинхронной машины в синхронно вращающихся координатах *d*–*q* описываются в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} U_{dS} \\ U_{qS} \\ U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dS} \\ i_{qS} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_{dS} \\ \lambda_{qS} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_1 \lambda_{qS} \\ \omega_1 \lambda_{dS} \\ -\omega_2 \lambda_{qr} \\ \omega_2 \lambda_{dr} \end{bmatrix}; \tag{5}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dS} \\ \lambda_{qS} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_S & 0 & L_m & 0 \\ 0 & -L_S & 0 & L_m \\ -L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dS} \\ i_{qS} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Уравнение движения ротора ветроагрегата с двойным питанием запишется в виде

$$\frac{J}{n_P}\frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_{em}, \quad (7)$$

$$T_{em} = n_P L_m \left( i_{qS} i_{dr} - i_{dS} i_{qr} \right). \quad (8)$$

Здесь $U_{dS}$, $U_{qS}$ и $i_{dS}$, $i_{qS}$ – напряжение и ток статора в осях *d* и *q* соответственно; $U_{dr}$, $U_{qr}$ и $i_{dr}$, $i_{qr}$ – напряжение и ток ротора в осях *d* и *q*; $L_S$, $L_r$ – индуктивность статора и ротора; $L_m$ – взаимная индуктивность; $\lambda_{dS}$, $\lambda_{qS}$ и $\lambda_{dr}$, $\lambda_{qr}$ – потокосцепление статора и ротора по *d* и *q*; $\omega_1$, $\omega_2$ – синхронная угловая скорость и скорость скольжения соответственно: $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$; $T_m$, $T_{em}$ – механический и электромагнитный моменты.

Номинальные значения параметров ветростанции с двойным питанием приведены в табл. 2.

*Таблица 2*

**Параметры ветроагрегата с двойным питанием**

| Обозначение | Описание | Значение |
|---|---|---|
| $P_{\text{ном}}$ | Номинальная мощность | 2000 кВт |
| $U_{\text{ном}}$ | Номинальное напряжение | 690 В |
| $R_S$ | Сопротивление статора | 0,007 о. е. |
| $L_S$ | Индуктивность статора | 0,171 о. е. |
| $R_r$ | Сопротивление ротора | 0,005 о. е. |
| $L_r$ | Индуктивность ротора | 0,156 о. е. |
| $L_m$ | Взаимная индуктивность | 2,9 о. е. |
| $J$ | Инерция ротора | 5,04 |
| $n_p$ | Число полюсов | 6 |
| $U_{DC\text{ном}}$ | Номинальное напряжение сети *DC* *AC-DC-AC*-преобразователя | 800 В |
| $P_m$ | Номинальная механическая мощность | 1800 кВт |

Если синхронно вращающиеся оси *d*–*q* ориентировать на вектор напряжения статора в соответствии с [7], можно получить следующие уравнения:

$$i_{dS} = -\frac{L_m}{L_S} i; \;\; T_{em} = n_P \frac{L_m}{L_S} \lambda_S i_{dr}; \tag{9}$$

$$\sigma = \frac{L_s L_r - L_m{}^2}{L_S L_r}; \tag{10}$$

$$U_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \left(\omega_1 - \omega_r\right)\left(L_m i_{qS} + L_r i_{qr}\right);$$

$$U_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} - \left(\omega_1 - \omega_r\right)\left(L_m i_{dS} + L_r i_{dr}\right). \tag{11}$$

**Моделирование генератора дизель-агрегата.** На практике для исследования динамических режимов дизель-генератора широко используется модель Park [8], которая представлена в виде следующих уравнений:

- для цепи статора:

$$U_d = e'_d - r_S i_d + x''_q i_q; \tag{12}$$

$$U_q = e''_q - r_S i_q + x''_d i_d; \tag{13}$$

- для цепи ротора:

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{e_f + \left(x_d - x'_d\right) i_d - e'_q}{T'_{do}}; \tag{14}$$

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{-e'_d + \left(x_q - x'_q\right) i_q}{T'_{do}}; \tag{15}$$

$$\frac{de''_q}{dt} = \frac{\left(e'_q - e''_q\right) + \left(x'_d - x''_d\right) i_d}{T''_{do}}; \tag{16}$$

$$\frac{de''_d}{dt} = \frac{\left(e'_d - e''_d\right) + \left(x'_q - x''_q\right) i_q}{T''_{do}}. \tag{17}$$

Уравнение моментов – это уравнение движения ротора

$$T_j \frac{d\omega_r}{dt} = M_{dis} - M_g, \tag{18}$$

где $M_g$ – электромагнитный момент генератора

$$M_g = e''_d i_d + e''_q i_q - \left(x'_d - x''_d\right) i_d i_q. \tag{19}$$

Параметры генератора дизель-агрегата приведены в табл. 3.

*Таблица 3*

**Параметры генератора дизель-агрегата**

| Обозначение | Описание | Значение |
|---|---|---|
| $P_{\text{ном}}$ | Номинальная мощность | 16,62 МВт |
| $U_{\text{ном}}$ | Номинальное напряжение | 10,5 кВ |
| $r_S$ | Сопротивление статора | 0,053 Ом |
| $T_j$ | Инерция ротора | 1,4 |
| $n_p$ | Число полюсов | 8 |
| $n$ | Угловая скорость | 750 об/мин |

**Моделирование системы РГВИ в установившихся режимах.** Моделирование установившегося режима рассматривается на примере схемы РГВИ действующей в системе «Азерэнержи» (рис. 3). Расчеты режимов выполнены для различных вариантов выработки мощности на ветростанции и модульной дизельной станции. В табл. 4 приводятся результаты расчетов для режимов покрытия мощности нагрузки, присоединенной к шинам ветростанции на 25 и 50 % от выработки ее мощности.

Как видно из табл. 4, отключение связи сети РГВИ с энергосистемой уменьшает суммарную генерацию в сети на 8 % и соответственно снижается напряжение в общей точке подключения на величину, немного большую, чем нормально допустимая (5,5 %). При этом уменьшение покрытия нагрузки в основном достигается за счет роста выработки мощности на модульной дизельной станции при 25 % мощности от ВЭС.

*Рис. 3.* Схема РГВИ в системе «Азерэнержи»

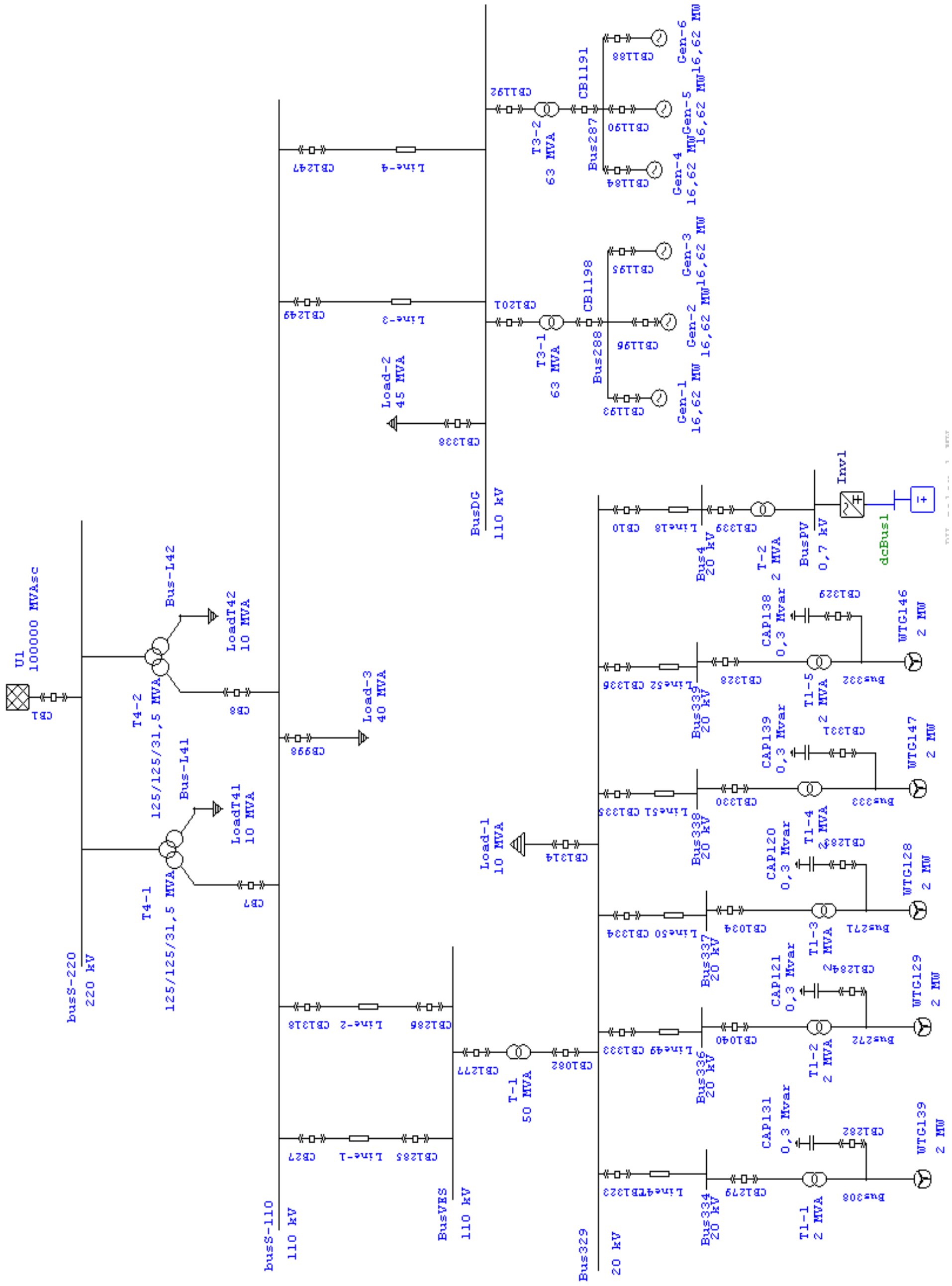
U1
100000 MVAsc
busS-220
220 kV
T4-1
125/125/31,5 MVA
T4-2
125/125/31,5 MVA
Bus-L41
Bus-L42
LoadT41
10 MVA
LoadT42
10 MVA
busS-110
110 kV
Load-3
40 MVA
Line-1
Line-2
Line-3
Line-4
BusVES
110 kV
T-1
50 MVA
Load-2
45 MVA
BusDG
110 kV
T3-1
63 MVA
T3-2
63 MVA
Bus288
Bus287
CB1198
CB1191
Gen-1
16,62 MW
Gen-2
16,62 MW
Gen-3
16,62 MW
Gen-4
16,62 MW
Gen-5
16,62 MW
Gen-6
16,62 MW
Load-1
10 MVA
Bus329
20 kV
Bus334
20 kV
Bus336
20 kV
Bus337
20 kV
Bus338
20 kV
Bus339
20 kV
Bus4
20 kV
T1-1
2 MVA
T1-2
2 MVA
T1-3
2 MVA
T1-4
2 MVA
T1-5
2 MVA
T-2
2 MVA
CAP131
0,3 Mvar
CAP121
0,3 Mvar
CAP120
0,3 Mvar
CAP139
0,3 Mvar
CAP138
0,3 Mvar
WTG139
2 MW
WTG129
2 MW
WTG128
2 MW
WTG147
2 MW
WTG146
2 MW
BusPV
0,7 kV
Inv1
dcBus1

*Таблица 4*

**Параметры режима сети РГВИ при наличии и отсутствии связи с энергосистемой**

| Параметр режима | Значение параметра | | | |
|---|---|---|---|---|
| | При наличии связи сети РГВИ с системой | | При отсутствии связи сети РГВИ с системой | |
| | ВЭС 50 % | ВЭС 30 % | ВЭС 50 % | ВЭС 30 % |
| Мощность генерации, МВт: | | | | |
| от энергосистемы | 37,0 | 11,6 | 0 | 0 |
| от модульной станции | 44,0 | 71,8 | 74,3 | 76,6 |
| от ветростанции | 5,0 | 2,5 | 5,0 | 2,5 |
| Мощность нагрузки, МВт: | | | | |
| в общей точке подключения | 36,2 | 36,1 | 33,2 | 33,1 |
| на шинах модульной станции | 40,6 | 40,7 | 37,6 | 37,6 |
| на шинах ветростанции | 9,2 | 9,2 | 8,4 | 8,4 |
| Напряжение в общей точке подключения, кВ | 108,7 | 108,6 | 104,1 | 104,0 |

**Моделирование системы РГВИ в переходных режимах.** Проведены исследования переходных режимов в системе РГВИ, вызванных возмущениями во внешней сети энергосистемы «Азерэнержи». На рис. 4 показана упрощенная однолинейная схема системы, к которой в узле п/ст 220/110 кВ Сангачал подключена система РГВИ, представленная на рис. 1. Параметры источников модульной солнечной *PV*-станции, ветростанции и дизельной станции приведены в табл. 1–3. В системе РГВИ исследовали переходные процессы при имитации коротких замыканий на ЛЭП, связанных с узлом подключения РГВИ. Полное моделирование режима при указанных возмущениях выполняли с помощью программного комплекса ETAP-6 [4]. Анализировали электромеханические качания агрегатов дизельной и ветростанции. Оценивали их влияние на колебание мощности в ЛЭП внешней сети, связанное с узлом общего подключения.

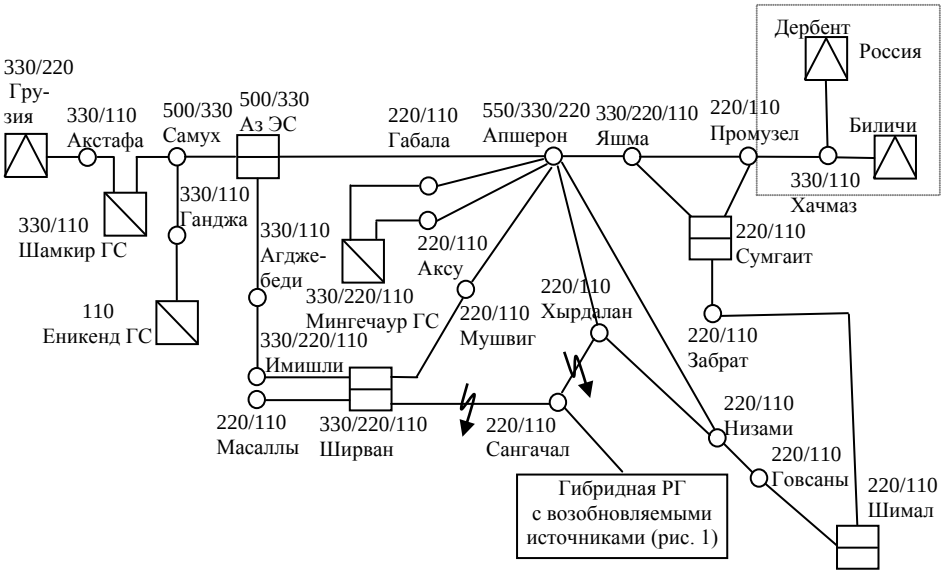


*Рис. 4.* Однолинейная схема энергосистемы Азербайджана

Каждая станция гибридной РГ – дизельная, ветровая и солнечная – отдельными линиями электропередачи через общую точку подключена к энергосистеме (п/ст 220/110 кВ Сангачал). Параметры источников солнечной *PV*-станции, ветростанции и дизельной станции приведены в табл. 1–3 соответственно.

Параметры схемы электрической сети РГ (трансформаторов, линий электропередачи и нагрузок) приведены ниже:

- трансформатор Т-1: номинальная мощность 125/125/31,5 МВ·А; номинальное напряжение 220/110/10,5 кВ; %$Z$ = 11,4/21,9/35,7; $X/R$ = 37/71/46 о. е.;
- трансформатор Т-2: номинальная мощность 63 МВ·А; номинальное напряжение 110/10,5 кВ; %$Z$ = 12,5; $X/R$ = 34,1 о. е.;
- трансформатор Т-3: номинальная мощность 50 МВ·А; номинальное напряжение 110/20 кВ; %$Z$ = 12,5; $X/R$ = 29,5 о. е.;
- трансформатор Т-4: номинальная мощность 2 МВ·А; номинальное напряжение 20/0,7 кВ; %$Z$ = 6,25; $X/R$ = 7,098 о. е.;
- трансформатор Т-5: номинальная мощность 2 МВ·А; номинальное напряжение 20/0,7 кВ; %$Z$ = 6,25; $X/R$ = 7,098 о. е.

Линии распределительной сети (DL): DL-1, DL-2, DL-3, DL-4; длина каждой линии – 5 км соответственно; напряжение 110 кВ; $R$ = 0,306 Ом·км; $X$ = 0,434 Ом·км; $Y$ = 2,6 Ом·км.

Номинальные значения нагрузок: $L_1$ = 40 МВт; 15 Мвар; $L_2$ = 45 МВт; 15,3 Мвар; $L_3$ = 40 МВт; 15 Мвар.

В системе РГ исследовали переходные процессы, вызванные возмущениями в электрической сети энергосистемы при имитации коротких замыканий или отключениях линий. Полное моделирование режима при указанных возмущениях выполняли с помощью программного комплекса ETAP-6. Анализировали электромеханические качания каждого отдельного источника и оценивали их влияние на протекание процессов в энергосистеме.

Кривые изменения относительных углов генераторов станции Ширван и модульной станции Сангачал, размещенной в системе РГВИ, после отключения трехфазного КЗ на ЛЭП Хырдалан – Сангачал и Ширван – Сангачал соответственно приводятся на рис. 5а, б. Время отключения КЗ – 0,12 с.

Сравнивая колебания углов на рис. 5а, б, нетрудно видеть, что амплитуды для случая КЗ на ЛЭП Хырдалан – Сангачал превышают соответствующие значения при КЗ на ЛЭП Хырдалан – Сангачал. Кроме того, анализ показывает, что колебания углов роторов генераторов модульной станции и станции Ширван совершаются с одинаковой периодичностью, равной примерно 1,6 с. Эти колебания практически затухают через 4–5 периодов. Кроме того, кривая колебания угла модульного генератора содержит также составляющую с периодом 0,35 с, которая характеризует собственные колебания ротора генератора, также затухающие примерно через 1,4–1,6 с, что соответствует инерционной постоянной дизель-агрегата. Из огибающей кривой угла ротора генератора, характеризующей качание системы от КЗ с периодом примерно 5,6–6,0 с, видно, что коэффициент линейного затухания этого качания равен 0,34.

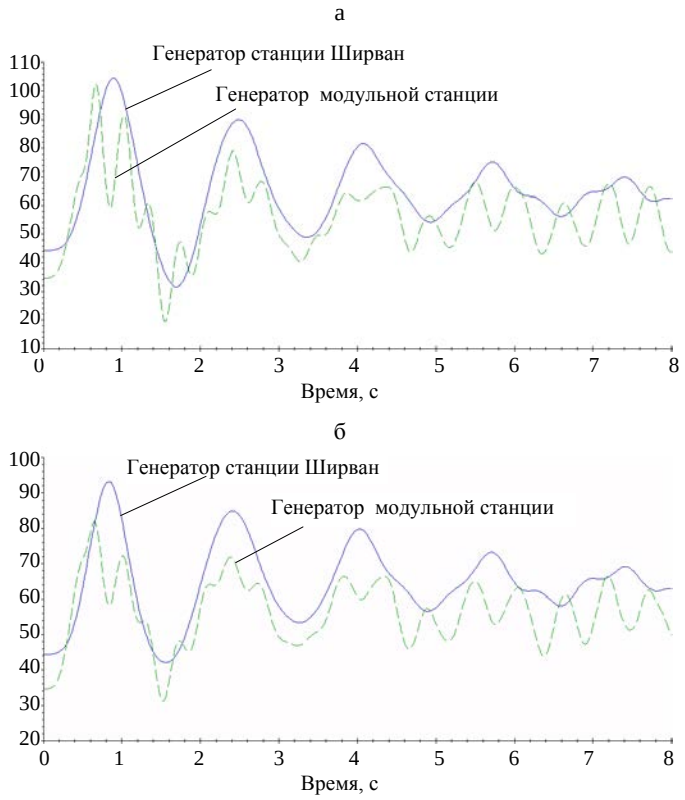


*Рис. 5.* Колебания углов роторов генераторов станции Ширван и модульной станции Сангачал после отключения трехфазного КЗ: а – на ЛЭП 220 кВ Хырдалан – Сангачал; б – на ЛЭП 220 кВ Ширван – Сангачал

**В Ы В О Д Ы**

1. Рост тенденции развития систем распределенной генерации с комбинированным использованием традиционных и возобновляемых источников выявил необходимость разработки новых технических условий функционирования энергосистемы, учитывающих наличие разнохарактерных генерирующих источников в распределительных сетях. В связи с этим при росте мощности возобновляемых источников важным является проведение комплекса исследований, связанных с оценкой их влияния на внешнюю энергосистему в установившихся и переходных режимах.

2. Разработана типовая модель распределенной генерации с базовыми возобновляемыми источниками – ветроустановки, солнечные *PV*-установки и традиционные источники – дизельные энергоустановки. Выведены уравнения, описывающие системы РГВИ в установившихся и переходных режимах для разных вариантов выработки мощности и нагрузки.

3. Составлены условия баланса мощности при работе сети РГВИ с энергосистемой и ее изолированной работе при разных участиях ветростанции в этом балансе. При автономной работе РГВИ для полного покрытия ее нагрузки необходима значительная доля выработки от дизельной станции.

4. Моделирование переходного процесса в системе РГВИ при возмущениях во внешней системе позволяет выявить степень влияния выработки

мощности на возобновляемых источниках на электромеханические колебания углов генераторов внешней системы, а также определить качание внешней системы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. C o m b i n e d AC-DC micro grids: case study-network development and simulation / N. R. Rahmanov [et al.] // Proceedings Plenary lecture no. 00PLL03 8th International Conference ICTPE-2012, Fredrikstad, Norway, 5–7 September. – Fredrikstad, 2012. – P. 8–12.

2. H y b r i d distributed generation systems with renewable sources: study operation conditions with GRID / N. R. Rahmanov [et al.] // Proceedings OF 8th International Conference ICTPE-2012, Fredrikstad, Norway, 5–7 September. – Fredrikstad, 2012. – P. 286–292.

3. N e w ERA for Electricity in Europe. Distributed Generation: Key issues, challenges and Proposed Solutions European Commission: EUR 20901, 2003, ISBN 92-894-6262–0.

4. E T A P Power Station 6.0. Electrical transient Analyzer Program. Operation Technology, inc. February 2002, southern California.

5. R o p p, M. E. Development of Matlab/Simulink model of single-phase grid-connected photovoltaic system / M. E. Ropp, S. Gonzalez // IEEE Trans. Energy Conv. – 2009. – Vol. 24, No 1. – P. 195–202.

6. C h a o, K. H. Modeling and fault simulation of photovoltaic generation systems using circuit-based model / K. H. Chao, C. J. Li, S. H. Ho // IEEE Int. Conf. Sustainable Energy Technol., Nov., 2008. – P. 290–294.

7. L i n, X. A. Hybrid AC/DC Micro grid and its Coordination Control / X. Lin, P. Wang, P. Chiang // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2011. – Vol. 2, No 2. – P. 278–286.

8. A b u r, A. Power System state Estimation: Theory and Implementation / A. Abur, A. G. Exposi. – New York: Marcel Dekkar, 2004.

Представлена Ученым советом
Института физики НАН Азербайджана

Поступила 25.10.2012

УДК 621.341.572

# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВУНАПРАВЛЕННОГО ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Канд. техн. наук, доц. БУРЛАКА В. В.[1)], докт. техн. наук, проф. ГУЛАКОВ С. В.[1)], инж. МАТЯШОВА Т. Н.[2)]**

*[1)]Приазовский государственный технический университет,*
*[2)]ПАО «ММК имени Ильича»*

Использование рекуперативных преобразователей является одним из наиболее доступных и известных путей экономии энергоресурсов. Преобразователи с возможностью возврата энергии в сеть нашли широкое применение в частотно-регулируемом электроприводе. Рекуперация энергии в сеть существенно экономит энергоресурсы, так как позволяет отказаться от тормозного резистора, на котором энергия рассеивается в виде теплоты.

Подавляющее большинство преобразователей частоты (ПЧ) с напряжением питания 0,4 кВ, используемых в частотно-регулируемом электро-