

Рахманов Н.Р., Ахмедова С.Т., Мамедов З.А.

«Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики» ОАО

Азербайджанская Государственная Морская Академия

AZ1037, г.Баку, ул. Г.Зардаби, 94

AZ1000, г.Баку, ул. З.Алиевой, 18

E-mail: nariman@срее.az, guliyeva_st@yahoo.com

Abstract. *In the energy system, total power consumption has a casual character, and that leads to a necessity of probabilistic modeling of operation for estimation of current state and metodics selection to control energy system. Besides, at peak regime then power system operate close to the limit values of power transmitted through the network the stochastic load fluctuations may resulted with voltage instability and even possibility of systems collapse. Results of probabilistic modeling of power flow considering different load values in form of distribution functions are presented. Probabilistic distribution functions for marginal loads and corresponding critical voltage values at the different fluctuating changes of load are prepared. The margins of casual load variations followed by voltage static instability are defined. To conduct evaluation there were used data and measurement in real network of studied grid.*

Аннотация. *В течение суток потребление мощности в энергосистеме меняется случайно и выработка энергии на ветростанциях имеет вероятностный характер. Это приводит к необходимости вероятностного моделирования режимов для оценки текущего состояния и выбора методики управления системой. Кроме того, при работе энергосистемы в режимах близких к пределу мощности, передаваемой по ее сетям, стохастические флуктуации нагрузки могут привести к неустойчивости напряжения с возможным коллапсом режима всей системы. В работе приводятся результаты вероятностного моделирования потокораспределения при разных задаваемых величинах нагрузок и дана сравнительная оценка уровня напряжения. Определены границы случайных изменений нагрузок, при которых наступает нарушение статической устойчивости напряжения. Для проведения расчетных экспериментов использованы данные натурных измерений электрической сети рассматриваемой системы.*

Xülasə. *Enerji sisteminin ümumi istehlak gücü təsadüfi xarakterlidir, bu da sistemin cari vəziyyətini qiymətləndirmək və idarəetmə metodikası seçmək üçün rejimlərin ehtimal modelləşdirməsi zərurətini yaradır. Bundan əlavə, enerjisistemin onun şəbəkələrindən ötürmə gücünün buraxılabilən həddə yaxın rejimlərdə işləməsi zamanı, yükün stoxastik dəyişmələri gərginliyin qeyri-dayanıqlılığına gətirib çıxarır və bütün enerjisistemin rejiminin kollapsına səbəb ola bilər. Məqalədə, paylanma funksiyası şəklində, yükün müxtəlif verilən qiymətləri üçün güc axınının paylanmasının ehtimal modelləşdirilməsinin nəticələri göstərilir. Yüklərin müxtəlif dəyişmələri zamanı, hədd yüklərinin və onlara uyğun kritik gərginlik qiymətlərinin paylanmasının ehtimal funksiyası qurulub. Gərginliyin statistik dayanıqlılığının pozulması baş verən halda, yüklərin təsadüfi dəyişmələrinin sərhədləri təyin edilib. Hesablama təcrübələrinin aparılması üçün, tədqiq edilən sistemin elektrik şəbəkəsinin natur ölçmələrindən istifadə olunub.*

Key words: *energy system, probabilistic modeling, stochastic load fluctuations, power generation, voltage profile*

Ключевые слова: *энергосистема, вероятностное моделирование, стохастические флуктуации нагрузки, мощность генерации, профиль напряжения*

Açar sözlər: *enerjisistem, ehtimal modelləşdirilməsi, yükün stoxastik dəyişməsi, generasiya gücü, gərginlik profili*

Введение. С ростом установленной мощности ветроисточников в энергосистеме возникает необходимость улучшения устойчивости напряжения путем повышения эффективности регулирования режима по реактивной мощности и напряжению. Учитывая неопределенный и прерывистый характер выработки мощности от подключенных к системе ветроустановок, параметры, определяющие состояние устойчивости системы - пределы передаваемой мощности по сети, критические значения напряжений в ее узлах будут иметь случайный характер изменчивости. Определение значений этих параметров с учетом стохастичности вероятностного моделирования режима требует системы. В настоящее время предложены различные численные и аналитические методы анализа вероятностного потокораспределения в энергосистеме, вызванных стохастичностью нагрузки или генерации [1, 2].

1. Моделирование случайной выборки мощности генерации ветроустановок. Предложенные численные методы решения вероятностного потокораспределения сводятся к повторяющимся расчетам установившихся режимов для различных случайных значений суммарной выработки мощности ветроисточниками подключенными к энергосистеме [3]. Выборка случайных значений выработки мощности ветроисточниками формируется расчетным путем на основе замеров скоростей ветра и данным по параметрам ветротурбин в соответствии с выражением [5]:

$$P_{BT}(v) = 0,5\rho AC(\lambda, \beta)v^3 \quad (1)$$

где, ρ - плотность воздуха (1.225кг/м^3), A - ометаемая винтами ветротурбины площадь (м^2), $C\rho(\lambda, \beta)$ - коэффициент мощности, v - скорость ветра (м/с), β - угол поворота лопастей.

В зависимости от диапазона изменения скоростей ветра мощность, развиваемая ветротурбиной (выражение 1) может быть представлена в виде:

$$P_{BT} = \begin{cases} 0 & \text{при } v > v_{Cl} \text{ или } v > v_{Co} \\ P_m \frac{v - v_{Cl}}{v_H - v_{Cl}} & \text{при } v_{Cl} < v \leq v_r \\ P_m & \text{при } v_r < v \leq v_{Co} \end{cases} \quad (2)$$

где, P_m – номинальная мощность ветроагрегата, v_{Cl}, v_{Co} и v_H - скорости включения и прерывания работы, а также номинальная скорость ветротурбины соответственно.

Для ветротурбины, снабженной асинхронным генератором, выработка активной мощности и потребление реактивной мощности могут быть определены по следующим выражениям:

$$P_w = \frac{-Sr_2}{r_2^2 + S^2 X^2} u^2 \geq 0 \quad (3)$$

$$Q_w = \frac{SX}{r_2^2 + S^2 X^2} u^2 \leq 0 \quad \text{или} \quad Q_w = \frac{SX}{r_2} P_w \quad (4)$$

Пренебрегая активными потерями, выработку активной мощности асинхронным ветрогенератором можно представить $P_w = P_m$

$$P_w = \frac{-Sr_2}{r_2^2 + S^2 X^2} u^2 = \begin{cases} 0 & v \leq v_{Cl}, \quad v > v_{Co} \\ P_m \frac{v - v_{Cl}}{v_r - v_{Cl}} & v_{Cl} < v \leq v_r \\ P_m & v_r < v \leq v_{Co} \end{cases} \quad (5)$$

Как видно из приведенных выше выражений случайный характер изменчивости активной и реактивной мощностей асинхронного ветрогенератора отражают в себе стохастический характер изменчивости от стохастичности скорости ветра v через скольжение как функции от v_r .

2. Учет стохастичности мощности генерации ветростанций при моделировании режимов энергосистемы. Исследование влияния ветростанции на устойчивость напряжения является важным не только для определения предельной величины установленной мощности ветроисточников (ВИ), подключаемых к энергосистеме, а также на основе результатов этих исследований поддерживает надежность функционирования системы в условиях эксплуатации, т.е. поддерживать устойчивость напряжения во всех узлах электрической системы при флуктуациях выработки от ВИ. В работе рассматривается задача оценивания вероятности распределения критического значения напряжения при стохастичности выработки мощности ветростанций. Вероятностная модель режима системы при стохастических изменениях мощности генерации ВИ может быть представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_i = P_{g(i)}(\lambda) + \tilde{P}_{ВИ(i)} - P_{H(i)}(\lambda) - \tilde{U} \sum_{j=1}^N \tilde{U}_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ i \in N = N_{PV} + N_{PQ} \\ \Delta Q_i = Q_{g(i)}(\lambda) + Q_{CR(i)} - \tilde{Q}_{ВИ(i)} - Q_{H(i)}(\lambda) - \tilde{U}_i \sum_{j=1}^N \tilde{U}_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - \cos \delta_{ij}) = 0 \\ i \in N_{PQ} \end{array} \right. \quad (6)$$

где, $P_{g(i)}(\lambda), Q_{g(i)}(\lambda)$ - выработка активной и реактивной мощности традиционными источниками, подключенными к узлу i ;

$\tilde{P}_{ВИ(i)}^t, \tilde{Q}_{ВИ(i)}^t$ - значения случайных величин выработки активной мощности и потребления реактивной мощности ветроисточников на основе экспериментов по наблюдениям стохастических процессов изменения скорости ветра за определенные периоды времени t ;

$P_{H(i)}^t, Q_{H(i)}^t$ - активные и реактивные мощности нагрузки в узле i ;

$Q_{CR(i)}$ - мощность компенсирующего устройства, подключенного к узлу i ;

G_{ij}, B_{ij} - активные и реактивные проводимости связи между узлами i и j ;

λ - коэффициент загрузки сети (коэффициент прироста нагрузки);

N - общее число узлов сети, $N = N_{PV} + N_{PQ}$;

\tilde{U}_i, \tilde{U}_j - расчетные напряжения в узлах i и j системы для заданных

значений $P_{ВИ(i)}^{tk}, Q_{ВИ(i)}^{tk}$, из случайной выборки $P_{ВИ(i)}^t, Q_{ВИ(i)}^t$;

$t_k - k$ - ое фиксированное значение времени;

Выборка значений мощности $P_{ВИ(i)}^{tk}, Q_{ВИ(i)}^{tk}$ от суммарной выработки ветротурбин для определенных периодов времени составляется на основе расчетных экспериментов с использованием данных измерений (или получаемых моделированием) скоростей ветра, ранжируемых на четыре интервала их изменений: скорость, при которой ветротурбина запускается в работу (v_{Cl}); скорость, при которой ветротурбина прекращает (останавливается) работу (v_{Co}); скорость, при которой турбина производит номинальную мощность (v_H).

Пользуясь приведенными в [5] выражениями можно проводить расчеты значений мощности выработки ветротурбинами для разных периодов наблюдения в зависимости от изменения величины скорости в интервалах $v - v_{Co}; v_H - v_{Cl}$;

$$P_{BH} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v(t) < v_{Cl}, \quad v_{Co} \leq v(t) \\ \frac{v - v_{Cl}}{v_{Co} - v_H} & v_{Cl} \leq v(t) \leq v_H \\ P_{BH(H)} & v_H \leq v(t) \leq v_{Cl} \end{cases} \quad (7)$$

Устойчивость напряжения с помощью выше приведенных вероятностных моделей проводится на основе анализа результатов ВП, имитируемых большим количеством повторяющихся расчетов. Общие описания алгоритма этих расчетных экспериментов приводятся ниже:

1. Сбор данных о состоянии режима системы (мощности P , Q генерирующих и нагрузочных узлов, ограничения на потоки мощности по линиям, напряжениям в узлах).
2. Расчет потокораспределения для базового нормального режима (номинальные величины мощности в узлах нагрузок и генерации с учетом номинальной выработки ветростанции).
3. Расчеты вероятностного потокораспределения для значений выработки мощности от ветростанции на определенных интервалах времени, определяемых суточным графиком.
4. Проведение расчетов потокораспределения в величинах выработки мощности из полученной случайной ее выборки, путем повторения расчетов до предела загруженности.
5. Записать значения соответствующих P_{max} , $U_{кр}$.
6. Продолжение расчетов для разных значений подключаемой мощности ветростанции.
7. Уменьшить нагрузку до минимума и уменьшать соответственно генерацию от традиционных источников так, чтобы не было нарушений ограничения режима. Провести расчеты и найти генерацию от ветростанции.
8. То же повторить для случая увеличения нагрузки. Определить мощности генерации от ветростанции.
9. Составить массив выборок расчетных вариантов для разных мощностей, подключаемой ветростанции P_{max} , $U_{кр}$, P_{wind} .
10. Построить зависимость $P_{max} \rightarrow P_{wind}$ величина P_{wind}^{lim} когда P_{max} принимает наибольшее значение, представляет собой максимально возможную мощность подключения ветростанции к системе.

3. Результаты исследования. Предложенные в работе метод и алгоритм были опробованы в реальной энергосистеме Азербайджана. В результате расчетно-экспериментальных исследований были определены вероятностные характеристики выработки мощности, ее влияние на устойчивость напряжения, а также суммарная мощность ветропарка, возможная к подключению, из условия сохранения устойчивости напряжения в системе.

На рис. показана упрощенная схема исследуемой системы, которая представлена в виде двух связанных частей, в одной из которой подключен ветропарк, состоящий из ветротурбин с единичной мощностью 2,5МВт. Расчетные эксперименты проводились с учетом поэтапного роста суммарной установленной мощности ветропарка на 50МВт на каждом этапе развития. На основе исследования вероятностных характеристик скоростей ветра и соответствующих изменений выработки мощности [6-7]. Было принято, что следует моделировать эти изменения в интервале (0-5%), (0-10%) и (0-20%).

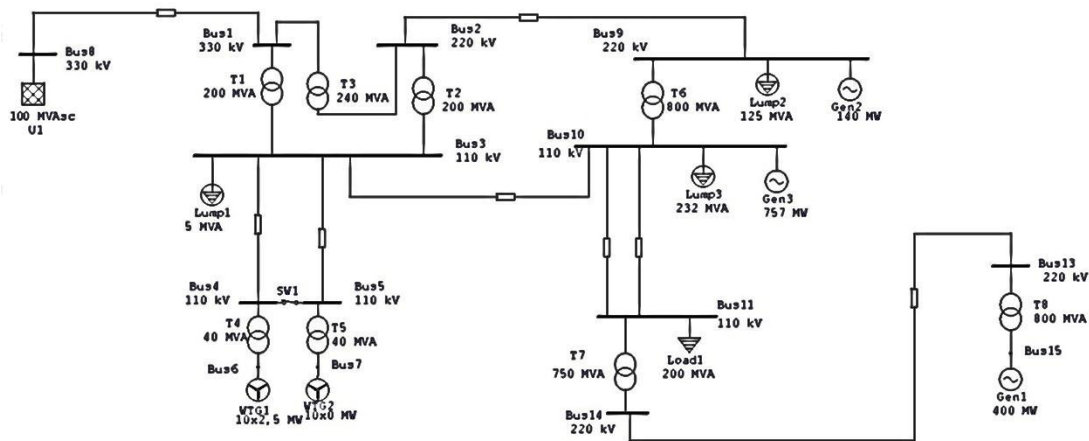


Рис. Упрощенная однолинейная схема сети

Ниже проводятся результаты вероятностного потокораспределения при стохастичности изменения генерации от ветропарка в указанных диапазонах.

Влияние вероятностной изменчивости выработки мощности ветротурбин на профиль напряжения.

В работе расчетное моделирование проводится по данным минутных замеров скоростей ветра. Относительное среднее значение скорости ветра в данном периоде наблюдения составляют измерения времени утреннего максимума нагрузки. Среднее значение выработки станций в данный период составлял 15 МВт.

На основе данных выработки составлена случайная выборка ее значений, которая использована при приведении повторяющихся расчетов потокораспределения. Изменения значений напряжения при работе ветростанции со средней скоростью 12,5 м/с в точке связи региона энергосистемы с ветростанцией и остальной частью системы (п/ст Хырдалан 110 кВ). Напряжение изменяется в интервале $\pm 0,3\%$ относительно исходного значения.

В соответствии с описанным в работе алгоритмом проведены многовариантные повторяющиеся расчеты потокораспределения для разных величин скоростей ветра, наблюдаемых в характерные периоды суток. В соответствии со значениям скоростей ветра составлены выборки выработки мощности ветростанцией по моделям (7) и определены вероятности распределения мощности ветростанции на различные периоды. Для каждого значения мощности, выдаваемой электростанцией в разные периоды проведены расчеты траекторий утяжеляемых режимов вплоть до максимальной величины при изменениях скоростей ветра в интервале 5,5 м/с – 11,5 м/с.

Расчетная оценка максимальной мощности ветростанции, подключаемой к системе соблюдая условия устойчивости по напряжению.

Поиск величины максимально возможной мощности ветростанции, подключаемой к энергосистеме приводится на основе анализа расчетов потокораспределения в системе для разных величин суммарной мощности ветротурбин и стохастической изменчивости скоростей ветра. В таблице приводятся обобщенные результаты расчета максимальных величин загруженности контролируемой линии электропередачи и соответствующей этой величине предельной мощности значение критического напряжения.

Как видно из таблицы максимально возможная мощность подключаемой ветростанции к энергосистеме, при которой сохраняется устойчивость напряжения составляет 200 МВт, соответственно величина критического напряжения 64,35% от установившегося.

Результаты расчетов для разных режимов генерации и
нагрузок по ВЛ 110кВ Хырдалан

| Режимы и объемы подключаемой ветромощности | Расчетные знач. крит. напр в % от номин $U_{расч} \%, кр$ | $P_{макс}$ МВт | $I_{т допус.}$ А | $P_{т допуск}$ МВт | Значение напряж. при предельно допуст. токе по нагреву $U, \%$ в режиме $I_{т допус.}$ |
|---|---|----------------|------------------|--------------------|--|
| Ветрогенерация отсутствует | 61,64 | 123,5 | 413,7 | 73,1 | 89,72 |
| С ветрогенерацией 50МВт ($\cos\varphi=1$) | 62,12 | 126,4 | 413 | 72,9 | 89,55 |
| ---- » ----- 100МВт ($\cos\varphi=1$) | 62,46 | 128,4 | 413,5 | 73,1 | 89,71 |
| ---- » ----- 150МВт ($\cos\varphi=1$) | 62,76 | 130,3 | 413,3 | 73,1 | 89,82 |
| ---- » ----- 200МВт ($\cos\varphi=1$) | 64,35 | 131,1 | 413,9 | 73,2 | 89,86 |
| ---- » ----- 250МВт ($\cos\varphi=1$) | 64,36 | 131,1 | 412,5 | 73 | 88,89 |
| ---- « ----- 300МВт ($\cos\varphi=1$) | 65,76 | 130 | 412,2 | 72,9 | 89,86 |
| ---- « ----- 350МВт ($\cos\varphi=1$) | 67,07 | 128,1 | 412,7 | 73 | 89,78 |
| ---- « ----- 400МВт ($\cos\varphi=1$) | 68,23 | 124,8 | 412,8 | 72,9 | 89,66 |
| ---- « ----- 50МВт ($\cos\varphi=0,95$) | 61,53 | 122,8 | 412,8 | 72,8 | 89,17 |
| ---- « ----- 100МВт ($\cos\varphi=0,95$) | 62,6 | 12,7 | 413,5 | 72,8 | 88,97 |
| --- « ----- 150МВт ($\cos\varphi=0,95$) | 63,64 | 118 | 413,1 | 72,7 | 88,74 |
| --- « ----- 200МВт ($\cos\varphi=0,95$) | 64,36 | 113,1 | 413,6 | 72,4 | 88,13 |

Выводы

- Развитие процесса интегрирования ветро- и солнечных источников в энергосистему создаёт на каждом этапе этого развития новые вызовы, которые состоят в следующем:
 - включение в энергосистему источников мощности с прерывистым и неопределённым характером генерации;
 - увеличение количества систем распределенной генерацией с гибридным составом источников;
 - выбор места размещения ветровой и солнечной станции определяется не экономической оценкой близости к узлам потребления электрической энергии;
 - создание новых программно-технических средств анализа управления режима на основе вероятностного моделирования;
- Для оценивания влияния этих вызовов в работе проведены исследования изменчивости режимов энергосистемы при подключении новых объемов генерирующей ветромощности. В основном эти исследования можно характеризовать следующими результатами:
 - разработана модель вероятностного потокораспределения с подключенной мощностью ветростанции;
 - предложен алгоритм расчета предела статической устойчивости напряжения с учетом стохастической изменчивости выработки от ВЭС;
 - предложен метод оценивания максимально допустимой по условиям устойчивости напряжения величины подключаемой мощности ветростанции к энергосистеме;
 - предложенные методы и алгоритмы апробированы на примере конкретной энергосистемы.

Результаты расчетных экспериментов представлены в виде распределения вероятности напряжений в системе при различных мощностях подключаемой ВЭС и различных скоростях ветра, траектории предельных режимов по пределу передаваемой мощности и им соответствующих значений критических напряжений.

Литература

1. Canizares C. Voltage Stability Assessment Concepts, Practices and Tools. IEEE/FES Power System Stability Subcommittee, Technical Report, 2002, 292p.
2. Anderson G., Donalek P., Farmer R., Hatziargyriou N., Kamwa I., Kundur P., Martins N., Paserba J., Porbeik P., Sanchez-Gasca J., Schulz R., Stankovic A., Taylor C. and Vital V.. Causes of the 2003 Major Grid Blackouts in North America and Europe and Recommended Means to Improve System Dynamic Performance. IEEE Transactions on Power Systems, vol.20, №4, November, 2005, pp.1922-1928
3. Ajarapu V. and Chisty C. The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis. IEEE Transactions on Power Systems, vol.7, February, 1992, pp.416-423
4. Hashimov A.M., Rahmanov N.R., Ahmadova S.T., Mustafayev A.A. Voltage stability problem for GRID with distribution generation and renewable sources. 11-th International Conference on “Technical and Physical Problems of Electrical Engineering”. 1-12 September- 2015, Bucharest, Romania, pp. 159-165
5. Podolsky D., Turitsyn K. Random load fluctuations and collapse probability of a power system operating near codimension saddle-node bifurcation. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES). Vancouver, BC, July, 2013, pp. 1-5
6. Nwankpa C. and Hassan R. A stochastic based voltage collapse indicator. IEEE Transactions on Power Systems, vol.5, №2, May-1990, pp.419-427
7. De Marco C. and Overbye T. An energy based security measure for assessing vulnerability to voltage collapse. IEEE Transactions on Power Systems, vol.5, №2, May-1990, pp.419-427