

## Studying effect of randomness wind speed and loads interactions on the probabilistic optimal power flow

Dr. Ziad Harmoush\*  
Akram Shukri\*\*

(Received 17 / 2 / 2019. Accepted 26 / 5 / 2019)

### □ ABSTRACT □

The Probabilistic optimal power flow (POPF) is an effective tool for analyzing the probability of energy demand and also the uncertainties for renewable power generation systems, thus providing basic information for farther decision making. The Probabilistic optimal power flow methods can be classified into simulation methods and analytical methods. One simulation method is the Monte Carlo Simulation (MCS), which calculates optimal power flow. In order to find probability distributions of the optimal power flow, a large number of samples are required, which leads to many complex calculations and thus more time. This has led to the proposal of analytical methods to speed up the process, as these methods improve the computational performance by creating a small number of samples, and since the number of samples is lower then the accuracy will decrease. One of the analytical methods is the point estimated method (PEM), which requires a number of absolute ideal load secretions

In this paper two schemas of point estimation methods were used to solve the ideal potential power flow,  $2m$  and  $2m + 1$ . In addition, load correlation samples are generated in the contract by way of Cholesky disassembly, and the internal point tracking method is used to solve the deterministic optimal power flow calculations. The proposed method was also tested on a modified model consisting of 5 assembly bars and 30 standard bars According to IEEE. The simulation results demonstrated the viability and efficacy of the  $2m + 1$  scheme for the solution of POPF for the electrical system associated with wind power plants. The effect of load correlation on the results of POPF was also clarified, which would reflect greater accuracy in the operation of the power system with correlated loads

**Keyword:** probabilistic optimal power flow- Mont Carlo Simulation- wind farms

---

\* Professor , electrical power systems department- faculty of mechanical and electrical engineering- Tishreen university- Lattakia- Syria.

\*\* Master degree in electrical power systems- Tishreen university- Lattakia- Syria.

## دراسة أثر عشوائية سرعة الرياح و ارتباط الاحمال على سريان الحمولة المثالي الاحتمالي

د. زياد هرموش\*

أكرم شكري\*\*

(تاريخ الإيداع 17 / 2 / 2019. قُبِلَ للنشر في 26 / 5 / 2019)

### □ ملخّص □

يعد سريان الاستطاعة المثالي الاحتمالي من الأدوات الفعالة لتحليل احتمال الطلب على الطاقة و أيضاً احتمالات القدرة المولدة من مصادر الطاقة المتجددة في أنظمة القدرة، و بالتالي يؤمن معلومات اساسية لإتخاذ قرارات أوسع. يمكن تصنيف طرق سريان القدرة المثالي الاحتمالي إلى طرق محاكاة و طرق تحليلية. إحدى الطرق المحاكاة هي محاكاة مونت كارلو (Monte Carlo simulation, MCS) و التي تقوم بحساب سريان الحمولة المثالي. و لإيجاد التوزيعات الاحتمالية لسريان الحمولة المثالي يطلب عدد هائل من العينات و التي تؤدي إلى عمليات حسابية كثيرة و معقدة و بالتالي زمن اكبر. أدى هذا إلى اقتراح الطرق التحليلية لتسريع العملية، حيث أن هذه الطرق تحسن من الأداء الحسابي عن طريق انشاء عدد عينات قليل، و حيث أن عدد العينات أقل بالتالي فإن الدقة سوف تتخفف. من الطرق التحليلية هي طريقة تقدير النقطة (point estimated method, PEM) و التي تتطلب عدد من سريانات الحمولة المثالية القطعية

في هذا البحث تم استخدام مخططين من مخططات طريقة تقدير النقطة في حل سريان الاستطاعة الاحتمالي المثالي، مخطط  $2m$  و مخطط  $2m + 1$ . بالإضافة الى ذلك يتم توليد عينات ارتباط الاحمال في العقد بطريقة تفكيك تشلولوسكي، و توظيف طريقة تتبع مسار النقطة الداخلية لحل حسابات سريان الحمولة المثالي القطعي power flow deterministic optimal، و أيضاً تم اختبار الطريقة المقترحة على نموذج معدل مكون من 5 قضبان تجميع و 30 قضيب معياري وفقاً ل IEEE. و أظهرت نتائج المحاكاة قابلية و فعالية مخطط  $2m + 1$  لحل POPF من اجل النظام الكهربائي المرتبط مع محطات القدرة الريحية. و أيضاً تم توضيح أثر ارتباط الاحمال على نتائج POPF، مما سيعكس دقة اكبر في عمل نظام القدرة الكهربائي مع ربط الاحمال

الكلمات المفتاحية: سريان الحمولة المثالي الاحتمالي - محاكاة مونت كارو - المزارع الريحية

\* استاذ - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

\*\* ماجستير - هندسة نظم القدرة الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

**مقدمة:**

تعتبر طاقة الرياح الأسرع نمواً بين مصادر الطاقة المتجددة و تزداد الاستطاعة المركبة حول العالم بشكل كبير مع مرور الوقت. عندما تكون استطاعة النظام الريحي تشكل 30% من استطاعة نظام القدرة غالباً ما يؤدي هذا الى إعادة تشكيل هذا النظام [1]، و ذلك بسبب الطبيعة غير المؤكدة لسرعة الرياح، و الذي يطرح تحديات متعلقة في التوزيع الاقتصادي و التشغيل الامثل لنظام القدرة. أيضاً تؤثر سرعة الرياح غير المؤكدة على كمية الوقود المستهلك في المحطات الأخرى و بالتالي على كلفة التوليد، الإنبعثات المضرة بالبيئة، حالة الجهد و الضياعات عند قضبان تجميع النظام. إضافة الى ذلك يجب إعادة تقييم أمان النظام و التجهيزات الاحتياطية عند وجود كمية استطاعة مولدة عن طريق العنفات الريحية غير مؤكدة.

ركزت العديد من الابحاث على تأثير أنظمة طاقة الرياح على تشغيل أنظمة القدرة. و بشكل رئيسي اتبع عدد منهم مرحلتين مستقلتين. المرحلة الاولى يتم فيها وضع نموذج للاستطاعة الريحية غير المؤكدة *uncertainty in wind power* و الذي يتألف بشكل رئيسي من نموذج سرعة الرياح عبر التوزيعات الاحتمالية او كسلاسل زمنية *time series*. تعتبر التوزيعات الاحتمالية و بشكل خاص توزيع وايبل هو الأكثر شيوعاً. بالرغم من إمكانية استخدام عمليات ماركوف، الشبكات العصبونية [2]. إن الانتشار الواسع و القابلية العالية للتطبيق لتوزيع وايبل قد جعله احد الحلول الموثوقة و ذلك بسبب امكانية استخدامه حتى عند الربط مع النماذج الفيزيائية [3]. أيضاً يعتبر تحديد معاملات توزيع وايبل من المسائل قيد الدراسة و التطوير [4]. لكن و على الرغم من هذا و من أجل معاملات مواقع محددة، فإن التوزيعات الاحتمالية المنشأة لا تقدم سرعة الرياح بشكل دقيق، مما أدى الى استخدام توزيعات بدون معاملات في حالات كهذه كطريقة توزيع النواة *kernel density method* [5] [6]. أيضاً يجب الاخذ بالحسبان جانب اساسي في المرحلة الاولى من نمذجة عدم قدرة الرياح غير المؤكدة و هو الارتباط بين المحطات الريحية [7]. ايضاً يمكن استخدام سلسلة منشور كورنيش- فيشر لنمذجة القدرة الريحية غير المؤكدة و تم استخدامها في دراسة اثر عدم يقينية سرعة الرياح على IEEE 118 قضيب تجميع [8]. و في حال عدم توفر المعطيات الكافية يتم استخدام عوامل ارتباط غوسيان لتوليد مجمعة بيانات اصطناعية [9].

المرحلة الثانية في دراسة اثر سرعة الرياح غير المؤكدة هي ادراج العينات المولدة لسرعة الرياح في نموذج التوزيع الاقتصادي ثم ادراج هذه الحالات في نموذج سريان الحملية المثالي لنظام القدرة. و التي غالباً ما تشير هذه المرحلة الى مسألة سريان الحملية المثالي الاحتمالي. ايضاً تم اقتراح طرق لدمج موثوقية توليد القدرة و حالات الاعطال في نموذج التوزيع بناء على توزيع بيتا *beta distribution* الاحتمالي لسرعة الرياح [10] تشمل معادلات سريان الاستطاعة المثالي على مشاكل البرمجة اللاخطية و القيود المتعددة [11]. تتضمن طرق الاحتمالات الموجودة المطبقة على نظام القدرة الكهربائي محاكاة مونت كارلو *Monte Carlo simulation* (MCS) [12],[13]. طريقة تقدير النقطة *point estimate method* [14-16] ، طريقة مركبة العزم الثاني الاولى *first order second moment method* [17,18] ، الطريقة التراكمية *cumulant* [19,20]، و تقنيات الالتفاف *convolution* و توابعها،... [22,21] ، يمكن الحصول على الوصف الاحتمالي لحالة الجهد في العقد و سريان الحملية للفرع بشكل دقيق بواسطة *MSC* [12,13] ، و التي تستهلك جهد حسابي كبير. تطبق طريقة تقدير النقطة بشكل واسع على التوزيع الاحتمالي المناسب لحل سريان الاستطاعة المثالي، و التي تعتمد على حسابات

سريان الحملية المثالي القطعي والتي تستطيع حساب العزوم الاحصائية لقيمة الحالة بكفاءة [14,16]. ان الهدف الاساسي من طريقة العزم الثاني للمركبة الاولى [17,18] و الطريقة التراكمية [19,20] هو أن دخل و خرج المتحولات العشوائية يعبر عنها بقيمتها الوسطية و اجزائها المنقلبة. و بعدها يتم انشاء منشور تايلور في القيمة الوسطية لدخل المتحولات العشوائية لمعادلات سريان القدرة و بعدها يتم الحصول على العلاقة الخطية التقريبية بين مركبات الدخل و الخرج العشوائية.

### أهمية البحث و أهدافه:

تستخدم بشكل واسع حسابات سريان الاستطاعة المثالي Optimal Power Flow OPF لادارة الحلول المثالية بين الأمان و الاقتصادية في تشغيل و تخطيط نظام القدرة الكهربائي. و بالتالي يهدف هذا البحث الى حل مشكلة سريان الاستطاعة الاحتمالي مع ارتباط الأحمال وذلك بخلاف سريان الحملية المثالي القطعي فان سريان الحملية المثالي الاحتمالي يأخذ بعين الاعتبار عشوائية وتقلب ربط الأحمال و سرعة الرياح و بالتالي يمكن الحصول على نتائج أكثر دقة.

### طرائق البحث و مواده:

يناقش هذا البحث حساب سريان الحملية المثالي الاحتمالي و ذلك من اجل انظمة القدرة المرتبطة مع الانظمة الريحية مع الاخذ بعين الاعتبار ارتباط الاحمال و الاستطاعة المولدة. في البداية تم اقتراح نموذج سريان الحملية المثالي الاحتمالي لنظام قدرة مرتبط مع طاقة الرياح، ثم يتم توليد عينات الاحمال الموصولة بواسطة طريقة تفكيك تشولوسكي. و بناء على طريقة تقييم النقطة، تستخدم نوعان من مخططات تقدير النقطة  $(2m, 2m + 1)$  و محاكاة مونت كارلو لحل سريان القدرة المثالي الاحتمالي مع ارتباط الاحمال. و ايضا يتم توظيف طريقة تتبع النقطة الداخلية لحل سريان الحملية المثالي القطعي، و سيتم دراسة سريان القدرة المثالي الاحتمالي من اجل انظمة القدرة المرتبطة مع انظمة طاقة الرياح بوجود ارتباط الاحمال على نظام 5 و 30 عقدة من IEEE لتحليل اثر الاحمال المرتبطة على تشغيل نظام القدرة.

### نموذج سريان القدرة المثالي الاحتمالي لنظام قدرة مرتبط مع محطات الطاقة الريحية:

#### نموذج العنفة الريحية:

في التقدير بعيد المدى لسرعة الرياح، عادة ما يتم نمذجتها كالتالي [27]

$$\varphi(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (k > 0, v > 0, c > 1) \quad (1)$$

حيث  $v$  تمثل سرعة الرياح،  $\varphi(v)$  تابع كثافة احتمال وابل مع بارمتر الشكل  $K$  و بارمتر القياس  $c$

يعبر عن نموذج العنفة الريحية بالمعادلة (2)

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2)$$

حيث  $\rho$  كثافة الهواء ( $kg/m^3$ ) ،  $A$  المساحة التي يتم اختراقها خلال شفرات العنفة  $m^2$  ،  $v$  سرعة الرياح ( $m/s$ ) و  $C_p$  معامل القدرة

يمكن ان يعبر عن  $C_p$  كتابع نسبة سرعة طرف الشفرة و تبعا للتغير العشوائي لسرعة الرياح مع الوقت، تتغير قدرة خرج العنفة الريحية الموافقة و بالتالي يمكن توليد عينات سرعة الرياح بواسطة المحاكاة [21]، و يمكن حساب خرج قدرة الرياح الموافقة بواسطة استخدام المعادلة (2).

#### نموذج مولد الرياح التحريضي:

يمكن تبسيط الدارة المكافئة للمولد التحريضي الى النوع  $\Gamma$  عندما يستخدم المولد الريحي في المحطات الريحية، و بشكل مختصر يعبر عن القدرة الفعلية المحقونة الى الشبكة و القدرة الردية المسحوبة من الشبكة من قبل المولد التحريضي بالمعادلات [38]:

$$P_e = -\frac{U^2 r_2 / s}{(r_2 / s)^2 + x_k^2} \quad (3)$$

$$Q_e = -\frac{r_2^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_2 x_m s} P_e \quad (4)$$

حيث  $x_i$  الممانعة التحريضية للثابت،  $x_2$  اللمانعة التحريضية للدائر،  $r_2$  مقاومة الدائر،  $x_m, x_k = x_1 + x_2$  الممانعة المغناطيسية،  $s$  الانزلاق لدارة التحريضية،  $U$  جهد التوليد. يمكن الملاحظة من المعادلات (3) و (4) ان الاستطاعة الردية المسحوبة  $Q_e$  من قبل المولد الريحي لها علاقة مرتبطة مع الجهد  $U$  و الانزلاق  $s$  من اجل استطاعة فعلية  $P_e$  و بالتالي فان  $P_e, Q_e$  متحولات عشوائية.

#### نموذج سريان القدرة الاحتمالي المثالي POPF:

بالاخذ بعين الاعتبار نظام القدرة  $N$  عقدة، يتم تشكيل تابع الهدف لسريان القدرة الاحتمالي المثالي وذلك بجعل كلفة استهلاك الوقود اقل ما يمكن من اجل التوليد التقليدي

$$\min \sum_{i \in S_G} (a_{2i} P_{Gi}^2 + a_{1i} P_{Gi} + a_{0i}) \quad (5)$$

حيث  $S_G$  مجموعة التوليد،  $P_{Gi}$  استطاعة خرج المولد  $i_{th}$  الفعلية،  $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}$  معاملات كلفة التوليد. إن قيود التساوي من أجل سريان القدرة المثالي الاحتمالي بما يتضمن المحطات الريحية هي معادلات سريان القدرة، حيث تعطى بالمعادلات التالية:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - P_i(e, f, t) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - Q_i(e, f, t) = 0 \end{cases}, i = 1, \dots, N - 1, i \neq slack \quad (6)$$

حيث  $Q_{Gi}$  استطاعة خرج المولد  $i_{th}$  الردية،  $P_{Di}, Q_{Di}$  الاحمال الردية و الفعلية،  $P_i, Q_i$  هي تابع القسم الحقيقي  $e$  و القسم التخيلي  $f$  لجهد العقدة و نسبة التحويل  $t$ ،  $slack$  هي العقدة (المهملة او الركدة)،  $N_w$  هي مجموعة العقد الموصولة الى المزرعة الريحية، و بناء على النموذج المذكور مسبقا لنظام توليد القدرة الريحية في حال وصل المحطة الريحية عند  $i_{th}$  ،  $i \in N_w$  ، تعطى معادلات سريان الاستطاعة من اجل نظام قدرة يعمل مع مولدات ريفية بالمعادلات (7):

$$\begin{cases} P_{ei}(e_i, f_i, s_i) - P_{Di} - P_i(e, f, t) = 0 \\ Q_{ei}(e_i, f_i, s_i) - Q_{Di} - Q_i(e, f, t) = 0, \quad i \in N_w \\ P_{mi} - P_{ei}(e_i, f_i, s_i) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

حيث  $P_{ei}, P_{mi}$  هي القدرة الميكانيكية للتعنف الريحية و القدرة الكهربائية للمولد الريحي بالعقدة  $i_{th}$ ، و بملاحظة عدم ثبات سرعة الرياح و الاحمال المركبة، فان الاستطاعة الميكانيكية، و الاستطاعة الفعلية المحقونة الى الشبكة و الاستطاعة الردية المسحوبة من الشبكة تم وصفها بالنموذج الاحتمالي. إن مولدات القدرة الفعلية و الردية، النسب، مطالقات الجهود و تيارات الخطوط تم تحديدها تبعا لقيود نظام التشغيل

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad i \in S_G \\ Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad i \in S_G \\ t_{ij}^{min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{max} \quad i \in S_T \\ (V_i^2)^{min} \leq (e_i^2 + f_i^2) \leq (V_i^2)^{max} \quad i \in S_N \\ I_{ij}^2 \leq (I_{ij}^2)^{max} \quad (i, j) \in S_L \end{array} \right. \quad (8)$$

حيث  $S_L, S_N, S_T$  هي مجموعة المحولات، عقد النظام، حدود الخطوط على التوالي. و بشكل مبسط يمكن ان يعبر عن نموذج سريان الحمولة المثالي الاحتمالي المذكور سابقا بالعلاقة اللاخطية البرمجية التالية:

$$\begin{array}{l} \min f(x) \\ s.t \quad h(x) = 0 \end{array}$$

$$g(x) \geq 0 \quad (9)$$

حيث  $x = [P_G^T, Q_G^T, t^T, f^T, e^T, s^T] \in R^n$  هي اشعة متغيرات نظام التحكم و متحولات الحالة:  $f: R^n \rightarrow R$  هو تابع الهدف،  $h: R^n \rightarrow R^m$  تقدم قيود معادلات سريان القدرة،  $g: R^n \rightarrow R^p$  قيود التفاوت

### تفكيك تشولسكي:

في هذا البحث تم أخذ عينات البارامترات المرتبطة المتضمنة الاحمال و الاستطاعات المولدة بواسطة طريقة تفكيك تشولسكي. تعطى مصفوفة التشتت  $C_m$  من اجل  $N$  ابعاد شعاع عشوائي  $M$  في نظام القدرة بما يتضمن خرج المولدات و استطاعات الاحمال الردية و الفعلية بالتالي:

$$C_M = E(MM^T) = R \quad (10)$$

حيث  $R$  هي المصفوفة المتماثلة، يمكن الحصول على المصفوفة المتماثلة  $R$  بواسطة طريقة تفكيك تشولسكي، بمعنى  $R = LL^T$ ، حيث معامل تشولسكي  $L$  هو اصغر مصفوفة مثلثية، و بفرض ان  $W$  هو بعد شعاع عشوائي  $N$  مع انحراف مساو الى الواحد، بمعنى:

$$C_W = E(WW^T) = I \quad (11)$$

حيث  $I$  هي المصفوفة الوحدة

باستخدام  $M = LW$ ، يمكن التعبير عن مصفوفة التشتت ل  $M$  بالتالي

$$C_M = E(MM^T) = E(LWW^T L^T) = R \quad (12)$$

و بالتالي ربط العلاقة بالشعاع العشوائي ل  $M$

### طريقة تقدير النقطة:

#### تشكيل المسألة:

ان خرج المتحولات العشوائية  $Z$  لمسألة سريان الحمولة المثالي الاحتمالي ( جهود العقد و نسبة التحويل... )، يعبر عنها كتابع لخرج المتحولات العشوائية  $X$ ، و تتضمن أيضا الاستطاعات الفعلية و الردية للمولدات، الاستطاعات

الفعلية و الردية للاحمال و سرعة الرياح. العلاقة بين خرج المتحولات العشوائية  $Z$  و دخل المتحولات العشوائية  $X$  يمكن ان يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$Z = F(X) \quad (13)$$

عندما يتم الحصول على نتائج سريان القدرة المثالي الاحتمالي باستخدام طريقة تقدير النقطة، يمكن الحصول على الانحرافات المعيارية و المتوسط الحسابي.

### مخطط 2m

تم افتراض وجود  $m$  متحول عشوائي في نظام القدرة. و المتحولات هي كالتالي:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m]^T \quad (14)$$

حيث  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) هي رقم المتحول العشوائي  $i$ th ، و تشير الى الاستطاعات الفعلية من المولدات، الاستطاعة الردية للمولد، الاحمال الفعلية، الاحمال الردية و سرعة الرياح. يمكن تحديد  $x_i$  بطريقة تقييم النقطتين باستخدام متحولين  $x_{i,1}, x_{i,2}$  ، تعرف كل من  $x_{i,1}, x_{i,2}$  بالعلاقة التالية:

$$x_{i,k} = \mu_{x_i} + \xi_{i,k} \sigma_{x_i}, \quad k = 1, 2 \quad (15)$$

حيث  $\mu_{x_i}, \sigma_{x_i}$  تشير الى الانحراف المعياري و القيمة الوسطية للمتحول العشوائي  $x_i$  ،  $\xi_{i,k}$  تشير الى الموقع و الذي يعبر عنه بالعلاقة التالية:

$$\xi_{i,k} = \frac{\lambda_{1,3}}{2} + (-1)^{3-k} \sqrt{m + \frac{\lambda_{1,3}^2}{2}}, \quad k = 1, 2 \quad (16)$$

يعبر عن التشتت  $\lambda_{1,3}$  للمتحول العشوائي  $x_i$  بالعلاقة التالية:

$$\lambda_{1,3} = \frac{E[(x_i - \mu_{x_i})^3]}{(\sigma_{x_i})^3} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_{x_i})^3 f_{x_i} dx_i}{(\sigma_{x_i})^3} \quad (17)$$

يستبدل المتحول العشوائي بطرفي القيمة الوسطية،  $x_{i,1}, x_{i,2}$  على التوالي. و المتحولات الاخرى غير القطعية تستبدل بالقيم الوسطية. و هذا يعني  $(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_i}, \dots, \mu_{x_{m-1}}, \mu_{x_m})$  و بناء على طريقة تتبع مسار النقطة الداخلية path following interior point method, PFIP تجرى حسابات سريان القدرة المثالي القطعي لكل متحول. و بعدها يتم الحصول على القيم  $Z(i, 1) \& Z(i, 2)$  خرج المتغيرات العشوائية. بفرض ان  $\omega_{i,k}$  تشير الى تركيز الموقع عند النقطة  $(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_i}, \dots, \mu_{x_m})$  ، يمكن التعبير عن  $\omega_{i,k}$  بالعلاقة التالية:

$$\omega_{i,k} = (-1)^k \frac{1}{m} \frac{\xi_{i,3-k}}{\zeta_i} \quad (18)$$

حيث  $\zeta_i = 2 \sqrt{m + (\frac{\lambda_{1,3}}{2})^2}$  ، ان قيمة  $\omega_{i,k}$  تتراوح بين 0 و 1 و مجموع ذلك يساوي الواحد

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^K \omega_{i,k} = \frac{1}{m} \\ \sum_{k=1}^K \omega_{i,k} (\zeta_{i,k}) = \lambda_{i,j}, \quad j = 1, \dots, 2K - 1 \end{array} \right. \quad (19)$$

ان الموقع  $\xi_{i,k}$  و التركيز  $\omega_{i,k}$  يعبر عنهما بمجموعة معادلات لاختية (19)، و بالاعتماد على طريقة تقدير النقطة فان حساب سريان الاستطاعة القطعي المثالي سيجرى  $K$  مرة في حال كان يوجد هنالك  $K$  نقط محددة لكل دخل متحول عشوائي. و يمكن بذلك القول ان سريان القدرة المثالي القطعي سيجرى  $K \times m$  مرة في حال كان يوجد هنالك  $m$  متحولات غير قطعية، هنا  $K$  تساوي الى 2 من اجل مخطط  $2m$  [32,33]

عندما يتم الحصول على جميع قيم  $(\omega_{i,k}, \xi_{i,k})$  حيث  $(i = 1, \dots, m), (k = 1, \dots, K)$  فإنه يمكن حساب التابع  $F$  عند النقطة  $(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_i}, \dots, \mu_{x_m})$  العائد ل  $Z(i, k)$ . باستخدام  $\omega_{i,k}$  و  $Z(i, k)$  يمكن الحصول على سطر العزوم لخرج المتحولات العشوائية و فق التالي

$$E[Z^j] \cong \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \omega_{i,k} (Z(i, k))^j = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \omega_{i,k} [F(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_i}, \dots, \mu_{x_m})]^j \quad (20)$$

حيث  $K$  هو معامل يعتمد على طريقة Hang، و اكثر من ذلك يمكن الحصول بسهولة على الانحراف المعياري و الوسطي ل  $Z$  [34].

$$\mu_z = E[Z] = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \omega_{i,k} (Z(i, k))$$

$$\sigma_z = \sqrt{\text{var}(Z)} = \sqrt{E(Z^2) - \mu_z^2} \quad (21)$$

و من الانحراف  $\lambda_{i,3}$  يمكن الحصول على الموقع  $\xi_{i,k}$  و يمكن بعدها حساب النقطتين  $(x_{i,1}, x_{i,2})$  مع الوزن  $\omega_{i,k}$  في الموقع  $x_i$ . تستبدل المتحولات العشوائية بالنقطتين المحددتين لاجراءات حساب سريان الحمولة المثالي القطعي، و الذي يعتمد على طريقة تتبع مسار النقطة الداخلي PFIP . و بالتالي يمكن حساب خرج المتحولات العشوائية  $Z$  [35]

### مخطط $2m+1$

في المخطط  $2m + 1$  يستخدم لكل متحول ثلاثة تراكيز  $(K = 3)$ . احد مواقع التراكيز يساوي الى متوسط المتحول العشوائي، و بالتالي فان الموقع الافتراضي المطابق يساوي الى الصفر. حيث انه بالامكان الوصول الى اول اربع عزوم لكل متحول عشوائي  $x_i$  باستخدام المخطط [36,37]  $2m + 1$  يعطى الحل للموضع و الوزن بمخطط  $2m + 1$  بالعلاقات من 22 الى 25

$$\xi_{i,k} = \frac{\lambda_{i,3}}{2} + (-1)^{3-k} \sqrt{\lambda_{i,4} - (3/4)\lambda_{i,3}^2}, \quad k = 1,2 \quad (22)$$

$$\xi_{i,3} = 0 \quad (23)$$

$$\omega_{i,k} = \frac{(-1)^{3-k}}{\xi_{i,k}(\xi_{i,1} - \xi_{i,2})}, \quad k = 1,2 \quad (24)$$

$$\omega_{i,3} = \frac{1}{m - \frac{1}{(\lambda_{i,4} - \lambda_{i,3}^2)}} = \frac{1}{(m - \omega_{i,1} - \omega_{i,2})} \quad (25)$$

من المعادلة 22 و 23 يمكن ملاحظة أن  $\xi_{i,k}$  ( $i = 1,2, \dots, m ; k = 1,2,3 \dots$ ) لمخطط  $2m + 1$  لا يعتمد على العدد  $m$  لدخل المتحولات العشوائية، و التي تختلف عن مخطط  $2m$  و حيث ان الموقع  $\xi_{i,3} = 0$ ، فان  $x_{i,k}$  تصبح  $\mu_{x,i}$  وفقا للمعادلة (15) يكون الوزن المطابق لتلك النقطة هو مجموع  $\omega_{i,3}$  اي

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^m \omega_{i,3} = 1 - \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_{i,4} - \lambda_{i,3}^2} \quad (26)$$

حيث تعرف العزوم  $J$ th بالعلاقة التالية

$$E(Z^j) \cong \omega_0 [F(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_i}, \dots, \mu_{x_m})]^j + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^K \omega_{i,k} [F(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_i}, \dots, \mu_{x_m})]^j \quad (27)$$

يتطلب مخطط  $2m + 1$  حساب  $2m+1$  مرة للتابع  $F$  و تركيز نقطتين لكل متحول عشوائي. وذلك لانها تأخذ بالحسبان الانحراف  $\lambda_{i,4}$  لدخل المتحولات العشوائية، بالتالي فان مخطط  $2m + 1$  اكثر دقة من مخطط  $2m$



## الخوارزمية الكاملة

لقد تم حل مسألة سريان القدرة المثالي الاحتمالي  $POPF$  لنظام قدرة كهربائي مرتبط مع طاقة الرياح مع احمال مرتبطة بطريقة تقدير النقطة. لتحليل و مقارنة الفعالية لطريقة تقدير النقطة تستخدم محاكاة مونت كارلو مع ارتباط الاحمال لحل سريان الاستطاعة الاحتمالي المثالي. يتم اعتبار معامل الارتباط لجميع المتحولات العشوائية المرتبطة  $0.9$  و الانحراف المعياري للمنحول العشوائي  $\sigma = 5\%$  من قيمته المتوقعة، تقدم الخوارزمية الكاملة كالآتي:

## خوارزمية لحل مسألة سريان القدرة المثالي الاحتمالي مع ارتباط الاحمال باستخدام طريقة تقدير النقطة

1. وضع القيم الابتدائية لجهد العقد و الانزلاق للمولد الريحي، تحديد الاعداد للمتحولات العشوائية، بما يتضمن الاستطاعات الفعلية لوحدات التوليد، الاستطاعات الردية لوحدات التوليد، الاستطاعة الفعلية للاحمال، الاستطاعة الردية للاحمال و سرعة الرياح.

2. يحسب الوزن  $\omega_{i,k}$  و الموقع  $\xi_{i,k}$   $i = 1,2,3 \dots, m, k = 1,2,3 \dots$  باستخدام مخططات مختلفة لطريقة تقدير النقطة في فراغ التوزيع الطبيعي المعياري.

3. تحسب النقط المقدره  $x_{i,k}$  ( $i = 1,2, \dots, m, k = 1,2, \dots, K$ ) للمتحولات العشوائية للمخططات المختلفة بطريقة تقدير النقطة

4. باستثناء سرعة الرياح العشوائية، يتم الحصول على النقط المقدره مع الاحمال المرتبطة الثابتة في التوزيع الطبيعي المعياري بواسطة طريقة تفكيك تشولوسكي

5. باستثناء سرعة الرياح العشوائية، تحول المتحولات العشوائية للنقط المقدره مع الارتباط من فراغ التوزيع الطبيعي المعياري الى فراغ التوزيع الطبيعي باعتبار ان الانحراف المعياري  $5\%$  عن القيمة المتوسطة لبيانات نظام القدرة

6. بناء على شكل مقياس توزيع وايبل، فان النقط المحددة لسرعة الرياح العشوائية في فراغ التوزيع الطبيعي المعياري تحول الى نقط سرعة عشوائية في توزيع وايبل.

7. حساب القدرة الميكانيكية للعنفة الريحية و القدرة الكهربائية باستخدام المعادلات (2) و (3)

$$8. \text{ وضع قيم } E(Z_r^j) = 0, E(Z_r) = 0, k = 1$$

9. استخدام طريقة تتبع مسار النقطة الداخلي لحل سريان الحمولة المثالي القطعي [35].

10. يتم تصحيح انزلاق المولد التحريضي بالتزامن مع جهد العقد عند كل عملية تكرار لحساب سريان الحمولة المثالي الاحتمالي، و من ثم حساب القيمة المحددة  $Z_r$  لجهد العقدة و استطاعة العقدة.

11. حساب النتائج التي تم الحصول عليها في كل خطوة باستخدام (28)، و ضبط  $k = k + 1$

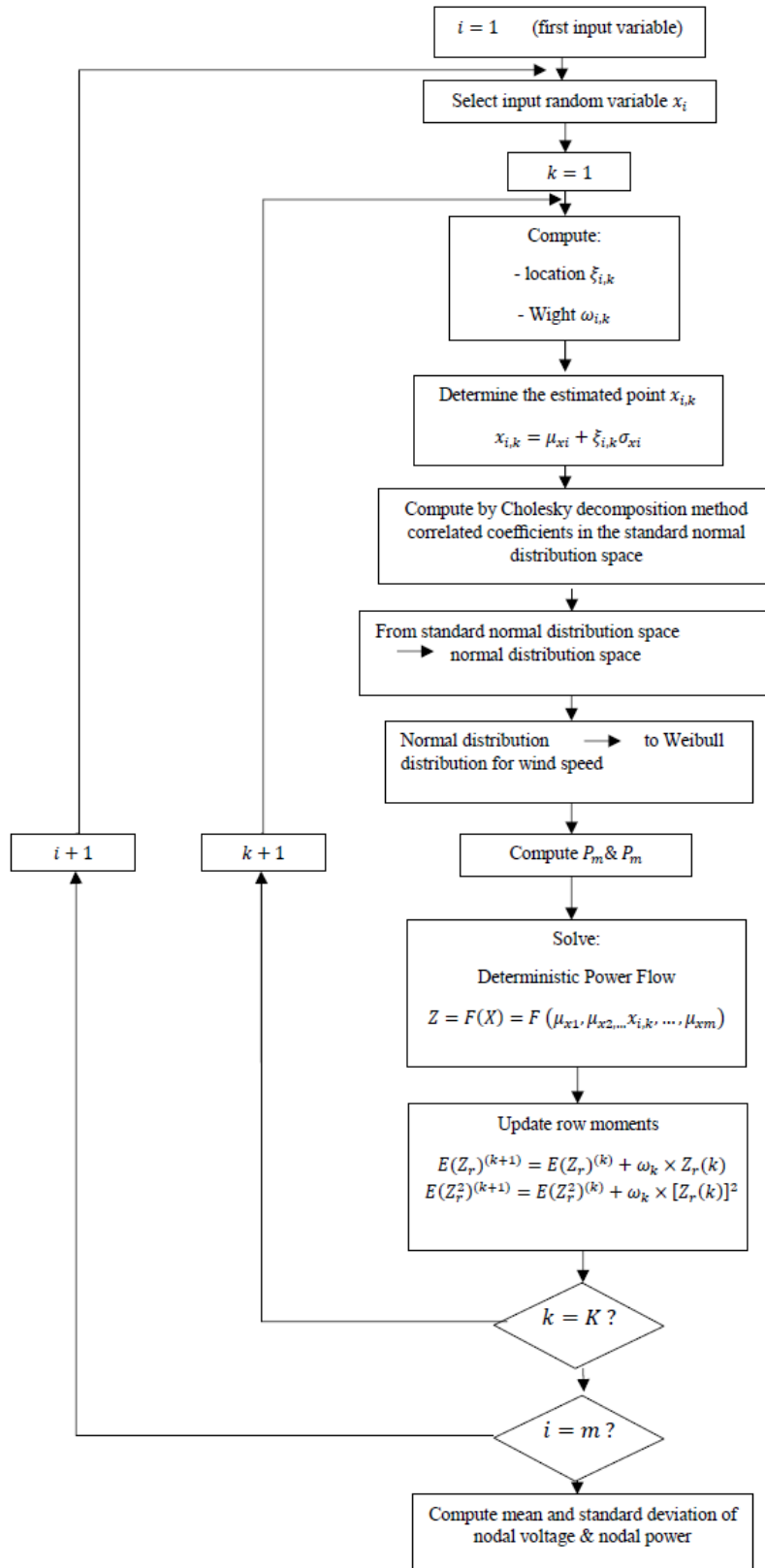
$$(28) \begin{cases} E(Z_r)^{(k+1)} = E(Z_r)^{(k)} + \omega_k \times Z_r(k) \\ E(Z_r^2)^{(k+1)} = E(Z_r^2)^{(k)} + \omega_k \times [Z_r(k)]^2 \end{cases}$$

12. تنتهي العملية عندما يتم معالجة كل المتحولات العشوائية

13. حساب المتوسط المعياري لجهد العقد و استطاعة العقد

### حل سريان الحمولة المثالي الاحتمالي مع الاحمال المرتبطة باستخدام محاكاة مونت كارلو

1. وضع القيم الابتدائية لجهد العقدة و انزلاق المولد الريحي. تحديد عدد المتحولات العشوائية، بما يتضمن الاستطاعات الفعلية لوحداث التوليد، الاستطاعات الردية لوحداث التوليد، استطاعة الاحمال الفعلية، استطاعة الاحمال الردية، سرعة الرياح.
2. من اجل سرعة رياح عشوائية، يتم توليد 10000 عينة سرعة رياح بواسطة توزيع واييل، و يتم حساب الاستطاعة الميكانيكية و الاستطاعة الكهربائية باستخدام (2) و (3). و من اجل متحولات عشوائية اخرى، 10000 عينة عشوائية يتم الحصول عليها عشوائيا في فراغ التوزيع الطبيعي المعياري.
3. باستثناء سرعة الرياح يتم الحصول على عينات المتحولات مع معاملات احمال ثابتة باستخدام تفكيك تشولسكي.
4. بناء على المتوسط و الانحراف المعياري لدخل المتحولات العشوائية يتم تحويل عينات المتحولات العشوائية في فراغ التوزيع الطبيعي المعياري الى القيم المقابلة في فراغ التوزيع الطبيعي، حيث ان القيمة المتوسطة هي البيانات الاساسية لنظام القدرة و الانحراف المعياري هو 5% عن القيمة الوسطية
5. يتم استخدام تتبع مسار النقطة الداخلية PFIP لحل سريان القدرة المثالي القطعي.
6. يتم تصحيح انزلاق المولد التحريضي بالتزامن مع جهد العقد في كل عملية حساب لسريان الحمولة المثالي الاحتمالي. و من ثم تحسب قيم  $Z_r$  لجهد العقدة و استطاعة العقدة.
7. يتم انتهاء العملية عند حساب سريان القدرة المثالي القطعي ل 10000 عينة من طريقة محاكاة مونت كارلو. و اذا تحقق هذا يتم حساب المتوسط و الانحراف المعياري لجهد العقدة و استطاعة العقدة. و في حال لم يتحقق يتم العودة الى الخطوة الخامسة لحساب سريان الحمولة المثالي القطعي.



الشكل (1) خوارزمية لحل مسألة سريان القدرة المثالي الاحتمالي مع ارتباط الاحمال باستخدام طريقة تقدير النقطة

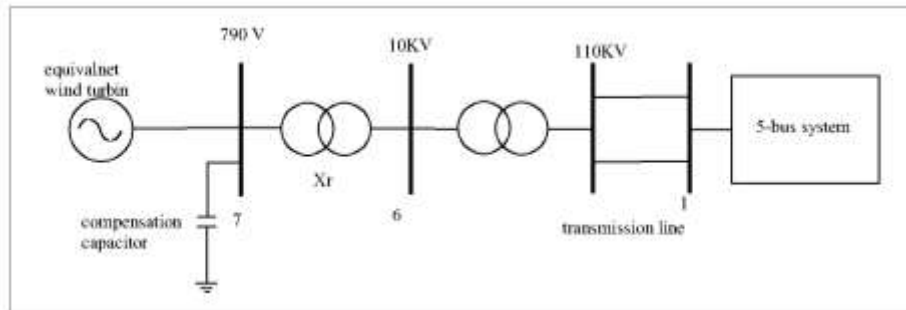
## النتائج و المناقشة

تم اختبار الطريقة المقترحة على نظامي اختبار 5 عقد و 30 عقدة من IEEE المعيارية. تم اخذ جميع البيانات بالقيم الواحدية و قيمة استطاعة الاساس هي 100MVA. تم نمذجة الخوارزمية على ماتلاب [28]. لدينا 20 عنفة ريحية متطابقة في مزرعة رياح، الاستطاعة الاسمية لكل منها 600KW. تعطى بارمترات المزرعة الريحية ب  $\rho = 1.22245 \frac{kg}{m^3}$ ,  $A = 1840m^2$ ، تم تحديد السرعة الاسمية للعنفة الريحية و سرعات القطع بالقيم التالية:  $13.5; 3; 20 m/sec$ . بارمترات المولد الريحي:  $r_1 + jx_1 = 1,38 + j16,6$ ;  $r_2 + jx_2 = 0,62 + j8,17$  و ممانعة التمدنط :  $x_m = 591,18$ .

تم استخدام مخطط  $2m$  و  $2m + 1$  في طريقة تقدير النقطة لحل سريان القدرة المثالي الاحتمالي مع ارتباط الاحمال. و لمقارنة اداء طريقة تقدير النقطة، تم استخدام محاكاة مونت كارلو لحل سريان الحمولة المثالي الاحتمالي لنفس النظام. بمحاكاة العلاقة (1) باستخدام  $k = 10,7$  و بامتر القياس  $c = 6,289$  ل  $10000$  عينة سرعة رياح. و باستخدام العلاقة (2) يتم حساب 10000 خرج استطاعة رياح. و بعدها يتم حساب سريان القدرة المثالي الاحتمالي وفق الخطوات المقدمة مسبقا.

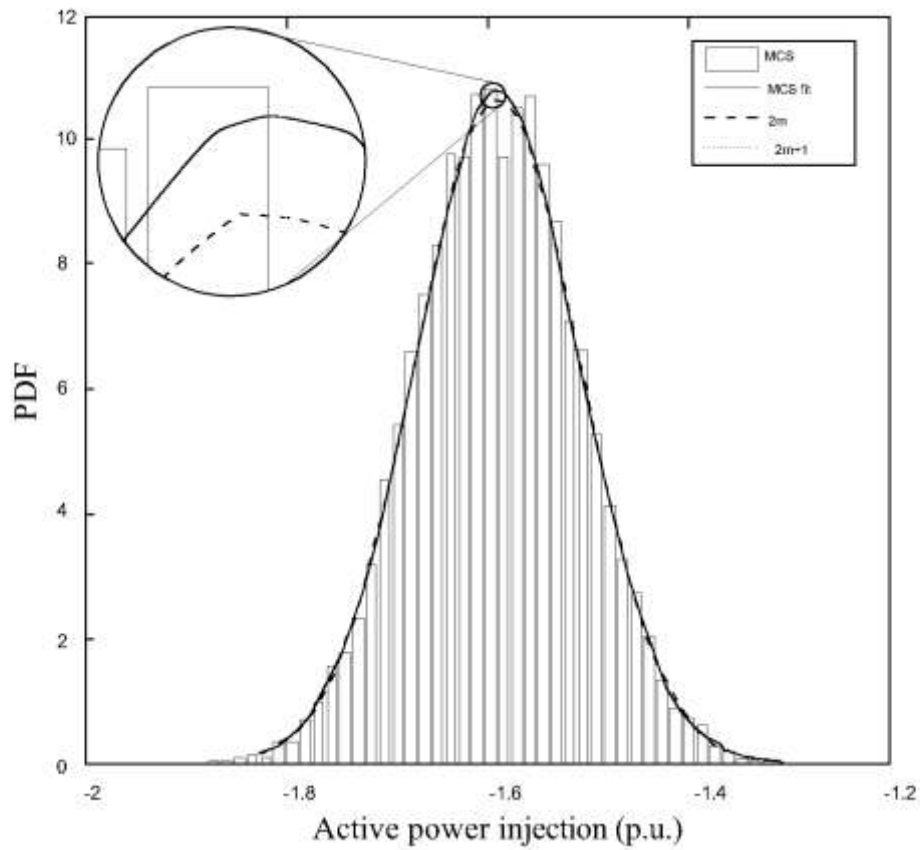
### نظام IEEE 5 عقد الاختباري:

في نظام قدرة مكون من 5 عقد، تربط المزارع الريحية المكافئة الى العقدة 1 من القضبان الخمسة عبر محولتي رفع و دارة خطوط نقل مضاعفة، و بالتالي تم اضافة العقدتين 6 و 7 كما هو مبين بالشكل (2). و وفقا لنتائج سريان الحمولة المثالي الاحتمالي مع استقلال و ارتباط الاحمال، يمكن رسم منحنى تابع الكثافة الاحتمالي PDF للاستطاعات الفعلية المربوطة في العقدة و التي تم الحصول عليها من مخطط  $2m$  ،  $2m+1$  و محاكاة مونت كارلو.

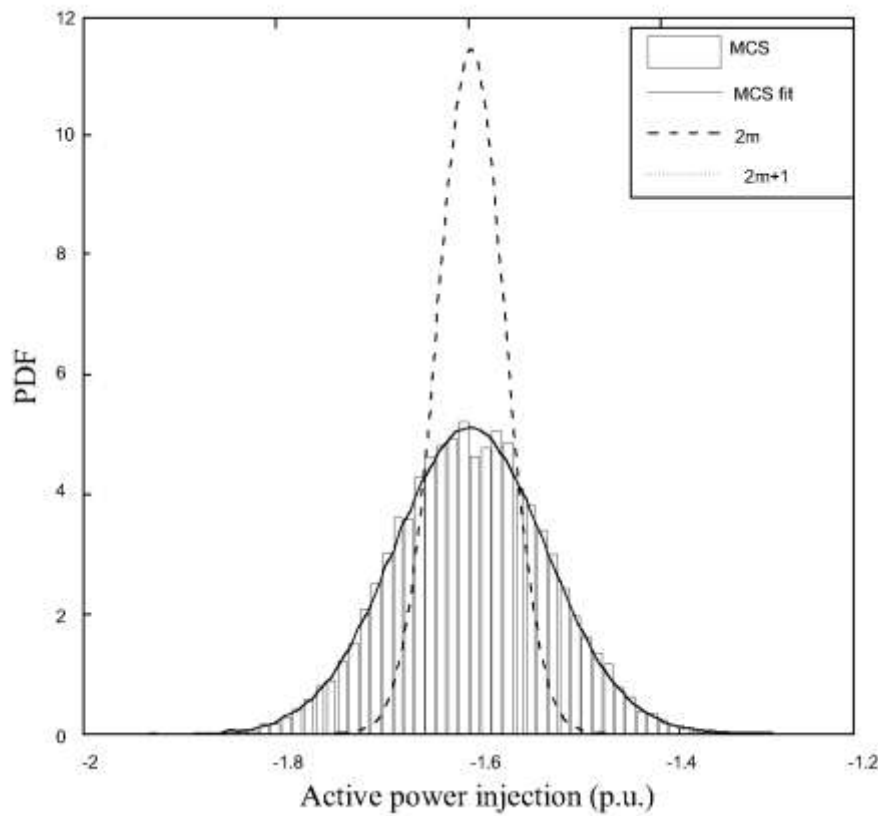


الشكل (2) نظام 5 عقد مربوط مع مزارع ريحية

تم عرض توابع توزيع الكثافة الاحتمالية للاستطاعة الفعلية للعقدة 1 مع استقلال و ارتباط الاحمال بالاشكال (3) و (4). يعبر المنحني المستمر عن المنحني الموافق لمحاكاة مونت كارلو مع التوزيع الطبيعي، يعبر المنحني المتقطع عن نتائج مخطط  $2m+1$  ، يعبر المنحني المنقط عن نتائج مخطط  $2m$  و تعبر الاعمدة عن نتائج محاكاة مونت كارلو.



الشكل (3) تابع الكثافة الاحتمالي للاستطاعة الحقيقية للعدة 1 مع استقلال الاحمال

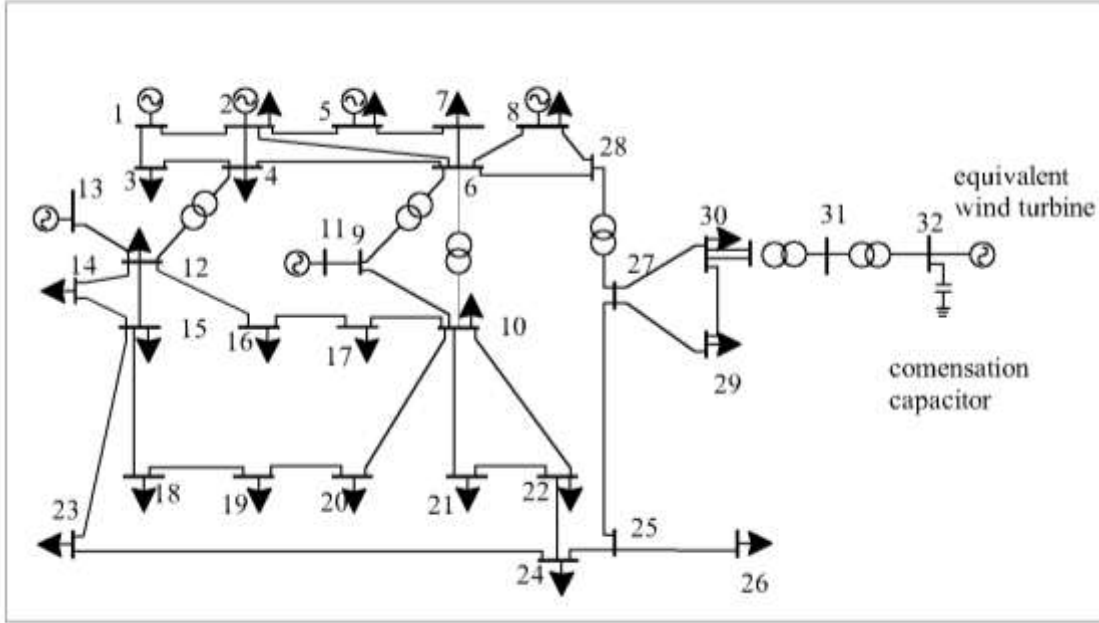


الشكل (4) تابع الكثافة الاحتمالي للاستطاعة الحقيقية للعقدة 1 مع ارتباط الاحمال

من الشكل (3) يمكن ايجاد انه مع استقلال الاحمال فان توابع توزيع الكثافة الاحتمالية للاستطاعة الفعلية في العقدة 1 التي تم الحصول عليها من مخطط  $2m$  و  $2m+1$  هي مشابهة للنتائج التي تم الحصول عليها من محاكاة مونت كارلو بشكل رئيسي. من الشكل (4) مع ارتباط الاحمال يمكن الملاحظة ان تابع توزيع الكثافة الاحتمالي للاستطاعة الحقيقية للعقدة (1) التي تم الحصول عليه من مخطط  $2m+1$  يتطابق مع ذلك الذي تم الحصول عليه من محاكاة مونت كارلو، في حين ان تابع الكثافة الاحتمالي من مخطط  $2m$  ينحرف بشدة عن تلك النتائج التي تم الحصول عليها من محاكاة مونت كارلو. مع الاخذ بالحسبان انحراف دخل المتحولات العشوائية، بالتالي فإن مخطط  $2m+1$  يؤمن دقة نتائج اكبر من مخطط  $2m$ .

### نظام IEEE 30 عقدة الاختباري

تم وصل المحطة الريحية المكافئة عند العقدة 30 من نظام IEEE 30 عقدة الاختباري عبر محولتي رفع و دارة خطوط نقل قدرة مضاعفة كما هو مبين في الشكل (5). ان مؤشرات الخطأ للمتوسط و الانحراف المعياري لنظام IEEE 30 عقدة الاختباري مبينة في الجدول (1).  $\epsilon_f, \epsilon_e$  هي متوسط الاخطاء النسبية للقسم الحقيقي و القسم التخيلي لجهود العقد،  $\epsilon_p, \epsilon_Q$  هي متوسط الاخطاء النسبية لاستطاعات العقد الفعلية و الردية.



الشكل (5) نظام 30 عقدة من IEEE موصول مع مزرعة ريفية

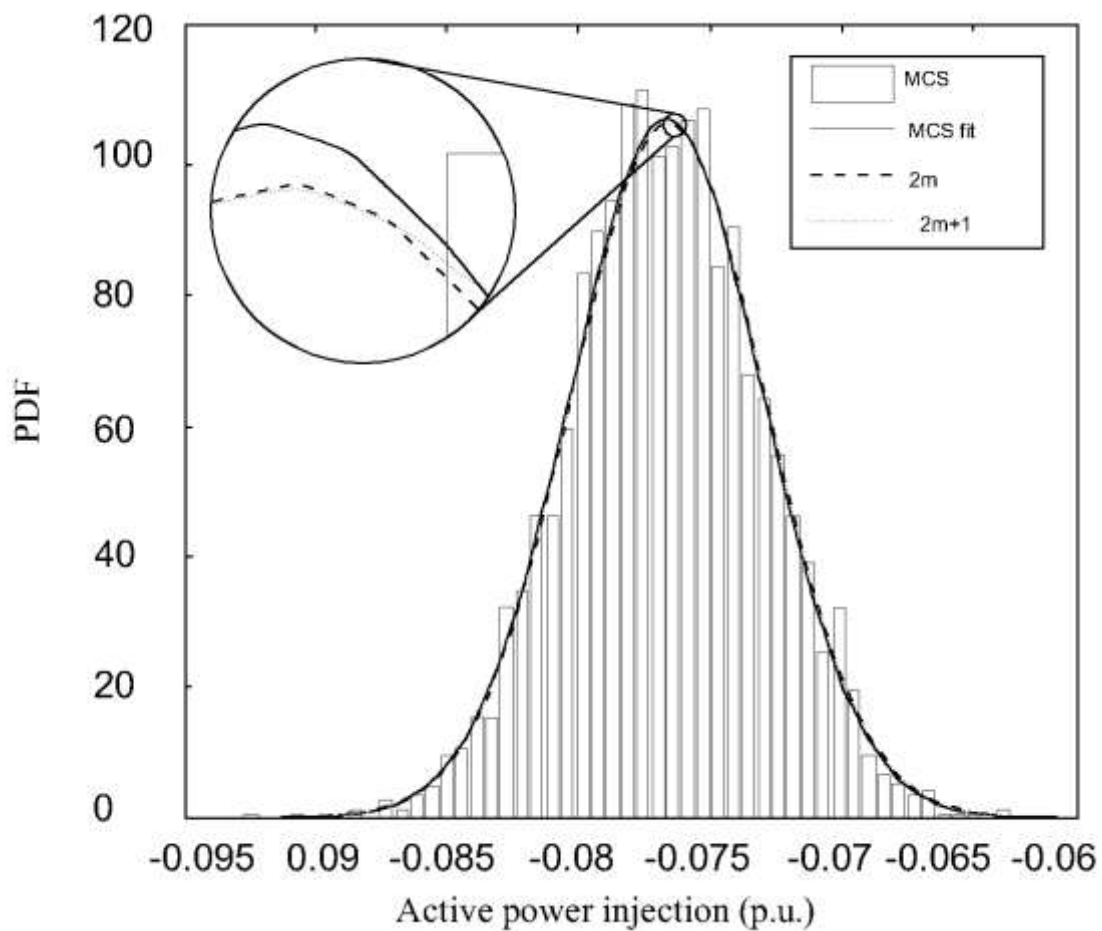
الجدول (1) متوسط مؤشرات الخطأ للنظام 30 عقدة الاختباري من IEEE المعدل

متوسط الخطأ		مع استقلال الاحمال		مع ارتباط الاحمال	
		2m	2m+1	2m	2m+1
$\epsilon_e$	$\mu$	0.0028	0.006	0.002	0.003
	$\sigma$	0.9917	1.0408	1.594	0.6001
$\epsilon_f$	$\mu$	0.0045	0.0078	0.0052	0.0036
	$\sigma$	0.6266	0.6151	0.4379	0.5444
$\epsilon_p$	$\mu$	0.0474	0.0915	0.0227	0.0229
	$\sigma$	0.0874	0.1138	0.4632	0.4802
$\epsilon_q$	$\mu$	0.0365	0.121	0.0524	0.0217
	$\sigma$	2.8654	0.307	4.4895	0.4919

من الجدول (1) يمكن الملاحظة و بالاذن بعين الاعتبار استقلالية الاحمال، أن متوسط الاخطاء للانحراف المعياري  $\sigma$  للجهود و الاستطاعات الفعلية التي تم الحصول عليها من مخطط  $2m$  هي قريبة من تلك التي تم الحصول عليها من مخطط  $2m + 1$ . نلاحظ ايضا إن متوسط الخطأ للانحراف المعياري للاستطاعة الردية من مخطط  $2m$  اي  $2.8654$  اكبر بشكل معتبر من القيمة من مخطط  $2m + 1$  اي  $0.307$ ، ايضا إن متوسط الأخطاء للقيمة المتوسطة  $\mu$  لجميع متحولات الخرج من مخطط  $2m$  هي أقل من تلك القيم من مخطط  $2m + 1$ . اما عندما يتم الاذن بعين الاعتبار ارتباط الاحمال، فإن القيمة الوسطية لمتوسط الاخطاء للجهود و الاستطاعات من كلا المخططين متقاربة.

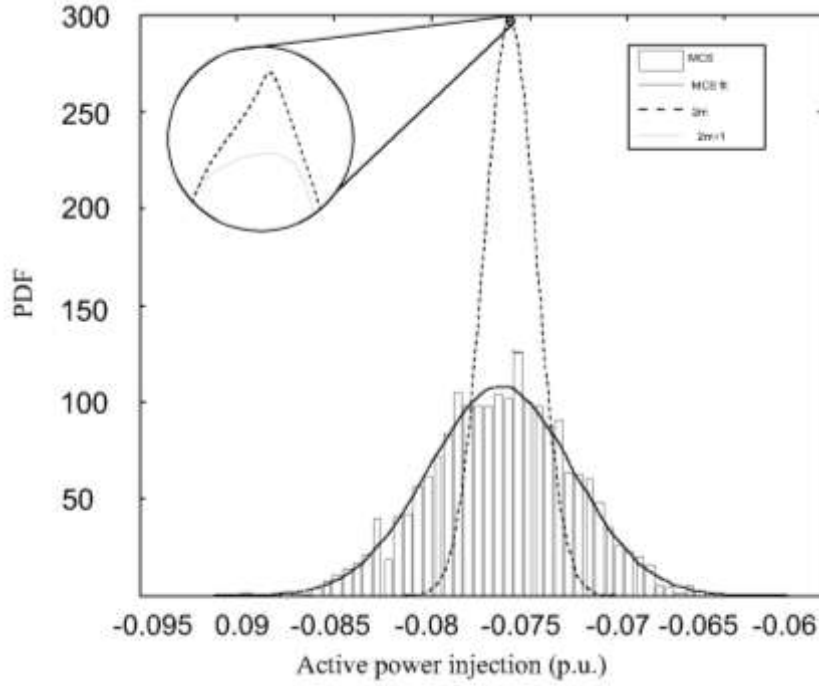
بالرغم من أن متوسط الأخطاء للانحرافات المعيارية لجزء الجهد الحقيقي و الاستطاعة الفعلية التي يتم الحصول عليها من مخطط  $2m$  اكبر بكثير من الأخطاء التي تم الحصول عليها من مخطط  $2m + 1$ . من الجدول (1) يمكن أيضا ملاحظة أن متوسط الأخطاء للقيمة الوسطية و الانحراف المعياري لمتحولات الخرج مع الاحمال المرتبطة هي مختلفة عن تلك ذات الاحمال المستقلة و تظهر أن ارتباط الاحمال يؤثر على نتائج سريان الحمولة المثالي الاحتمالي.

إن منحنيات تابع الكثافة الاحتمالي للإستطاعة الحقيقية المحقونة في العقدة رقم 4 مع الاحمال المرتبطة و المستقلة، التي تم الحصول عليها من مخطط  $2m + 1$  و  $2m$  و محاكاة مونت كارلو موضحة بالشكل (6) و (7) على التوالي.



الشكل (6) توابع التوزيع الاحتمالية للعقدة (4) مع استقلال الاحمال





الشكل (7) توابع التوزيع الاحتمالية للعقدة (4) مع ارتباط الاحمال

يصف المنحني المستمر نتائج محاكاة مونت كارلو الملائمة مع التوزيع الطبيعي، المنحني المنقط هو نتائج مخطط  $2m + 1$  و المنحني المقطع هو نتائج مخطط  $2m$  و الاعمدة هي نتائج مخطط مونت كارلو. من الشكل (6) يمكن رؤية أن نتائج الطرق المختلفة تقريبا هي نفسها تابع الكثافة الاحتمالي و تعطي مخططات تقدير النقطتين نتائج جيدة مع الاحمال المستقلة. و بالاخذ بعين الاعتبار ارتباط الاحمال، يمكن الملاحظة من الشكل (7) ان تابع الكثافة الاحتمالي الذي تم الحصول عليه من مخطط  $2m + 1$  يطابق ذلك الذي تم الحصول عليه من طريقة محاكاة مونت كارلو. تشير النتائج من الشكل (5) ان مخطط  $2m + 1$  يؤمن دقة اكبر في النتائج من مخطط  $2m$ .

### الاستنتاجات و التوصيات:

في هذا البحث تم دراسة سريان القدرة المثالي من أجل نظام كهربائي مرتبط مع طاقة الرياح مع أحمال مرتبطة بحيث يفترض ان كمية الاستطاعات المربوطة مع العقد تتبع التوزيع الطبيعي بينما سرعة الرياح تتبع توزيع واييل. و بواسطة طريقة تشولسكي تم تقديم ارتباط الاحمال. أيضا تم استخدام مخططات مختلفة في طريقة تقدير النقطة لحل سريان الاستطاعة الاحتمالي المثاليو استخدام طريقة تتبع النقطة الداخلية لحل سريان القدرة المثالي القطعي. و أظهرت نتائج المحاكاة أن مخطط  $2m + 1$  يؤمن دقة أكبر من أجل حل مسألة سريان القدرة المثالي الاحتمالي. و نوصي عند اجراء الدراسات في مسألة سريان القدرة المثالي الاحتمالي الاخذ بعين الاعتبار ارتباط الاحمال و الذي يؤمن مرجعية من اجل كل من الباحثين و المهندسين العاملين. وفقا للقيمة الوسطية و الانحراف المعياري و توابع الكثافة الاحتمالية لمتحولات الخرج التي تم الحصول عليها من نتائج سريان الحمولة المثالي في هذا البحث يمكن حساب حدود احتمالات الانحراف لجهود العقد و استطاعات الخطوط و تقييم أمان النظام.

## المراجع

- [1]. ACKERMANN.T. *Wind Power in Power Systems*. John Wiley and Sons. (2005)
- [2]. FEIJOO, T; VILLANUEVA, D. *Assessing wind speed simulation methods*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56 (2016) 473–483
- [3]. SIM, T.; ANA, E. *A new methodology for urban wind resource assessment*, *Renew. Energy* 89 (2016) 598–605
- [4]. MOHAMMADI, K; ALAVI, O.; MOSTAFAEIOUR, A.; GOUDARZI, N.; JALILVAND, M. *Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density*. *Energy Convers. Manage.* 108 (2016) 322–335
- [5]. QIN, Z.; LI, W. *Estimating wind speed probability distribution using kernel density method*. *Electric Power Syst. Res.* 81 (12) (2011) 2139–2146
- [6]. XU, X.; XU, S. *Estimating wind speed probability distribution by diffusion-based kernel density method*. *Electric Power Syst. Res.* 121 (2015) 28–37
- [7]. VALIZADEH, H.; TAVAKOLI, B.; GOLKAR, A.; MOGHADDAS-TAFERSHI. *Using Copulas for analysis of large datasets in renewable distributed generation: PV and wind power integration in Iran*. *Renew. Energy* 35 (9) (2010) 1991–2000
- [8]. USAOLA, J. *Probabilistic load flow with correlated wind power injections*. *Electric Power Syst. Res.* 80 (5) (2010) 528–536
- [9]. HAGDPIEL, S.; PAPAEMANNOUIL, A.; MATTHAIAS, S.; GORAN, A. S. Hagspiel, A. Papaemmannouil, S. Matthias and A. Göran. *Copula-based modeling of stochastic wind power in Europe and implications for the Swiss power grid*. *Appl. Energy* 96 (2012) 33–44
- [10]. OSORIO, G.; LUJANO-ROJAS, J.; MATIAS, J.; CATAL, J. *A probabilistic approach to solve the economic dispatch problem with intermittent renewable energy sources*. *Energy* 82 (2015) 949–959.
- [11]. WANG, H.Y.; MURILLO C.E.; ZIMMERMAN, R.D.; THOMAS, R.J. *On computational issues of market based-optimal power flow*, *IEEE Trans. PowerSyst.*22 (2007)1185–1193.
- [12]. ZHANG, H.; LI, P. *Probabilistic analysis for optimal power flow under uncertainty*. *IET Gener. Transm. Distrib.* 4(5) (2010)553–561.
- [13]. ZAKER, B.; MOHAMMADI, M. *Probabilistic optimal operation of a smart grid including wind power generator units*. in: *Proceedings of the International Conference on Smart Grids (ICSG), 2012, PP1-5.*
- [14]. VERBIC, G.; CANIZARES, C.A.; *Probabilistic Optimal Power Flow in Electricity Markets Based on a Two-Point Estimate Method*. *IEEE Trans. Power Syst.* 21 (4) (2006) 1883-1893.
- [15]. MORALES, J. M.; PEREZ, J. *Point Estimate Schemes to Solve the Probabilistic Power Flow*. *IEEE Trans. Power Syst.* 22 (4) (2007) 1594–1601.
- [16]. SU, C.L. *Probabilistic load-flow computation using point estimate method*. *IEEE Trans. Power Syst.* 20 (4) (2005) 1843–1851.
- [17]. LI, X.; LI, S.H. *Analysis of probabilistic optimal power flow taking account of the variation of load power*. *IEEE Trans. Power Syst.*23 (3) (2008) 992–999.
- [18]. MADRIGAL, M.; PONNAMBALAM, K; QUINTANA, V.H. *Probabilistic optimal power flow*. in: *Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998 pp.385–388.*
- [19]. SCHELLENBERG, W.; ROSEHART, J.; AGUADO, J. *Cumulant-based probabilistic optimal power flow (P-OPF) with Gaussian and gamma distributions*. *IEEE Trans. Power Syst.* 20 (2) (2005) 773–781.
- [20]. ZHANG, P.; LEE, S.T. *Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion*. *IEEE Trans. Power Syst.* 19 (1) (2004) 676–682.
- [21]. ALLAN, R.N. DA SILVA, L. BURCHETT, R.C. *IEEE Trans. Evaluation Methods and Accuracy in Probabilistic Load Flow Solutions*. *Power Appar. Syst.* 100 (5) (1981) 2539–2546.
- [22]. ALLAN, R.N.; BORKOWSKA, B.; GRIGG, C.H. *Probabilistic analysis of power flows*. *Proc. Inst. Electr.Eng.*124(2) (1977)154–160.

- [23]. LI, X.; LI, Y.Z.; LI, H.Y. *Comparison and analysis of several probabilistic power flow algorithms*. Proc. CSU-EPSA 21 (3) (2009) 12–17.
- [24]. MORALS, J.M.; BARINGO, A.J.; CONEIGO, A.J.; MINGUZE, R. *Probabilistic power flow with correlated wind sources*. IETGener. Transm. Distrib. 4 (5) (2010) 641–651.
- [25]. USAOLA, J. *Probabilistic load flow with correlated wind power injections*. Electr. Power Syst. Res. 80 (5) (2010) 528–536.
- [26]. PAPAETHYMIU, G.; PINSON, P. *Modeling of spatial dependence in wind Power forecast uncertainty*. in: Proceedings of the International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2008, pp.1–9.
- [27]. LI, X.; DU, D.J.; PEI, J.X.; MENHAS, M.I. *Probabilistic load flow calculation with Latin hypercube sampling applied to grid connected induction wind power system*. Trans. Inst. Meas. Contro 35 (1) (2011) 56–65.
- [28]. AI, Q.; GU, C.H. *Economic operation of wind farm integrated system considering voltage stability*. Renew. Energy 34 (3) (2009) 608–614.
- [29]. MORALES, J.M.; CONEJO, A.J.; PEREZ-RUIZ, J. *Simulating the impact of wind production on locational marginal prices*. IEEE Trans. Power Syst. 26 (2) (2011) 820–828.
- [30]. VILLANUEVA, A.; FEIJOO, A.; PAZOS, L.J. *Simulation of correlated wind speed data for economic dispatch evaluation*. IEEE Trans. Sustain. Energy 3 (1) (2012) 142–149.
- [31]. SHU, Z.; JIRUTITIJAROEN, P. *Latin hyper cube sampling techniques for power systems reliability analysis with renewable energy sources*. IEEE Trans. Power Syst. 26 (4) (2011) 2066–2073.
- [32]. MORALES, M.J.; PEREZ-RUIZ, J. *Point estimate schemes to solve the probabilistic power flow*. IEEE Trans. Power Syst. 22 (4) (2007) 1594–1601.
- [33]. VIARY, Z. N. C.; NERVES, C. A. *Integrated energy and reserve electricity market analysis using probabilistic optimal power flow*. IEEE Region10 Conference, 2010, pp.598–603.
- [34]. HONG, H. P.; *An efficient point estimate method for probabilistic analysis*. Reliab. Eng. Syst. Saf. 59 (3) (1998) 261–267.
- [35]. LI, X.; CAO, J.; DU, D.J. *Comparis on of Levenberg–Marquardt method and path following interior point method for the solution of optimal power flow problem*. Int. J. Emerg. Electr. Power Syst. 13(3) (2012) 1–21.
- [36]. CARAMIRA, G.; GARPINELLI, P.; VARILONE, P. *Point estimate schemes for probabilistic three-phase load flow*. Electr. Power Syst. Res. 80(2) (2010)168–175.
- [37]. LI, G.; ZHANG, P. *Comparison between two probabilistic load flow methods for reliability assessment*. in: Proceedings of the IEEE Conference on Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–7.
- [38]. HOMCHAUDHURI, M.; KUMAR, M.; DEVABHAKTUNI, V. *Market based approach for solving optimal power flow problem in smart grid*. in: Proceedings of the American Control Conference, 2012, pp. 3095–3100.