# جودة الكهرباء

د. عثمان بن عبدالله النذير

**شهدت المنظومات الكهربائية خلال القرن العشرين نمواً كبيراً؛ وذلك نتيجة للزيادة المستمرة في الطلب على الكهرباء. وليس من قبيل المبالغة القول بأن المنظومة الكهربائية تعد الأكبر والأكثر تعقيداً وتداخلاً في البنية التحتية لأي دولة معاصرة.**

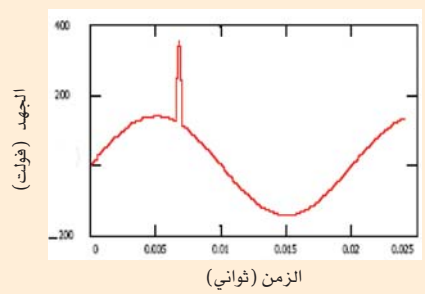
لقد تزايدت أهمية الكهرباء في الحياة العصرية بشكل كبير خلال العقود القليلة المنصرمة، إذ لم تعد مقصورة على استمرار التغذية الكهربائية، بل تجاوزتها لطلب خدمة كهربائية ذات جودة أعلى تجعل من المنظومة الكهربائية تعمل وفق ما خطط لها بدون فقد لأدائها أو نقص في عمرها الافتراضي.

## أنواع مشاكل جودة الكهرباء

ظهرت مشاكل جودة الكهرباء بشكل واضح في العقود الثلاثة الماضية، وذلك بسبب تزايد استعمال الأجهزة الحساسة مثل الحواسيب، إضافة إلى المعدات والأجهزة التي تسبب هذه المشاكل، حيث تعد اضطرابات الجهد الكهربائي من أكثر أنواع مشاكل الجودة شيوعاً. ترتبط المشاكل المتعلقة بجودة الكهرباء بشكل وثيق بالاستعمال المكثف لمعدات القوى الإلكترونية في الشبكة سواء كأحمال مستهلكة، أو نتيجة لاستعمالها في جانب التوليد. ومن أهم مشاكل جودة الكهرباء مايلي :

### ● انفعالات الجهد

تعرف انفعالات الجهد (Voltage Transients) بأنها تغير كبير ومفاجيء للجهد في وضعه الطبيعي لفترة قصيرة (جزء من المليون من الثانية)، وهي تمثل حوالي ١٠٪ من مشاكل جودة الكهرباء وتحدث - عادة - بسبب التفريغ الساكن (Electrostatic discharge)، وتفريغات الصواعق، ودخول وخروج الأحمال الكبيرة من وإلى الشبكة. ومن أهم مشاكل انفعالات الجهد: مسح بيانات الحاسبات (مع الذاكرة RAM)، وإلحاق الضرر بالدوائر الإلكترونية والأجهزة الكهربائية، ويمثل الشكل (١) أحد أنماط الانفعالات.



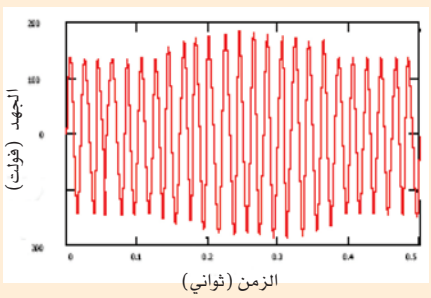

■ شكل (١) مثال على انفعال الجهد.

### ● تضخم الجهد

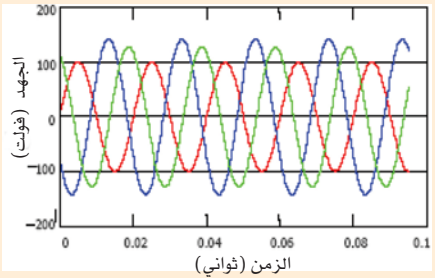
يعرف تضخم الجهد (Voltage Swell) بأنه زيادة في قيم الجهد لفترة قصيرة (أقل من دقيقتين)، أما إذا استمر هذا التضخم لفترة تتجاوز دقيقتين فإنه يصنف بأنه ارتفاع مستمر في الجهد، وهو يمثل حوالي ١٥٪ من مشاكل جودة الكهرباء، وإذا وصل التضخم لمستويات عالية؛ فإنه يؤدي إلى تلف الأجهزة الكهربائية، ومن أهم أسباب حدوث تضخم وارتفاع الجهد هو: تغيرات مستويات الأحمال الكبيرة، أو نتيجة لدخول وخروج الأحمال على خطوط الكهرباء ذات الضغط العالي وحينما يصل التضخم لمستويات عالية؛ فإنه يؤدي إلى تلف الأجهزة الكهربائية، ويوضح الشكل (٢) حالة من حالات تضخم الجهد.

### ● عدم اتزان و تماثل الجهد

يعرف عدم اتزان الجهد (Voltage Asymmetry) بأنه الفرق في قيم أو زاوية الجهد في النظام ثلاثي الأطوار، وقد يحدث بين الطور والطور




■ شكل (٢) مثال على تضخم الجهد.




■ شكل (٣) مثال على عدم توازن الجهد.

أو بين الطور والمحايد (Phase to Line) في نظام ثلاثي الطور. يمثل عدم اتزان الجهد ٢٠٪ من مشاكل جودة الكهرباء، وينتج عن التوزيع غير المتساوي للأحمال المغذاة من النظام أحادي الطور والتي تتغير باستمرار عبر النظام ثلاثي الطور، فضلاً عن أسباب أخرى تتمثل في: الإعاقة غير المتماثلة في ملفات المحولات، المصهرات المتعطلة، تعطل المواسعات ثلاثية الطور، وعدم التماثل في معاوقة النقل بسبب عدم اكتمال نقل الأطوار في خطوط النقل .

ينجم عن عدم اتزان الجهد في المنظومة الكهربائية: فقد للطاقة الكهربائية، وارتفاع الحرارة، وعدم الاستقرار ويكون فقد الطاقة الكهربائية كبيراً في حالة محركات الحث، حتى في الحالات التي يكون فيها عدم الاتزان منخفضاً، ويظهر الشكل(٣) حالة من حالات عدم توازن الجهد.

### ● هبوط الجهد

يعرف هبوط الجهد (Voltage Dip) بأنه انخفاض سريع لقيمة الجهد في فترة قصيرة، ومن أهم أسباب حدوثه: قصر الدائرة الكهربائية (Short Circuit – Faults) في المنظومة الكهربائية، أو في بادئات المحركات الحثية (Starting of Induction Motor). ومن المعلوم أن انخفاض الجهد بسبب دخول أحد محركات الحث يستمر وقتاً أطول من ذلك الناتج من حدوث قصر في أحد الدوائر، كما أن هبوط الجهد يتأثر بنظم التأريض المختلفة وقيمة معاوقة قصر الدائرة (Fault Impedance). كذلك تعد الصواعق من أكثر مسببات عطب وقصر دوائر النقل، ومن الأسباب الأخرى المتعلقة بهبوط الجهد تلك الأسباب المتعلقة بالطقس، والتي من الصعوبة بمكان التنبؤ بها، علماً بأن فترة حدوث الانخفاض تستغرق من ثمانية أجزاء بالألف من الثانية إلى دقيقة كاملة. كما أن هبوط الجهد يؤدي إلى عطل الأجهزة وتوقفها عن العمل خاصة في الأجهزة الحساسة، شكل(٤).

ومن المعلوم أن انخفاض الجهد له أنواع متعددة، مثل: أحادي الطور، أو عديد الأطوار، ومتوازن أو غير متوازن. تصمم معظم أجهزة مراقبة جودة الكهرباء لقياس مقدار انخفاض الجهد ومدة حدوثه وقياس القفز في زاوية الطور (Phase angle Jump)، شكل(٥)، حيث يجب مقارنة القفز في زاوية الطور مع نفس الزاوية قبل حدوث الانخفاض. ومن المعلوم بأنه يمكن الحصول على زاوية الطور قبل الانخفاض من نقاط العبور الصفرية (Zero Crossing) للمركبة الأساسية للجهد.

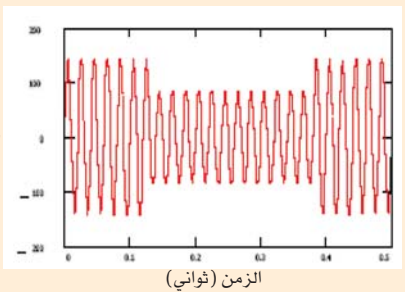
| نوع الجهاز | أقل جهد (واط) | أقصى زمن (م.ث) |
|---|---|---|
| بادئ المحرك | ٥٠ | ٥٠ |
| المعالج المنطق المبرمج | ٩٠-٥٠ | ٢٠-٨ |
| عاكسات المحركات | ٨٢ | ١,٥ |
| مقوم محرك الأقراص متغير السرعة | ٨٠-٥٠ | ٣-٢ |
| المعالج المتحكم في الحواسيب الرقمية | ٧٠ | ٨ |
| المتحكم في المحركات ذات التيار المستمر | ٧٠ | ٨ |
| الملامسات | ٨٨ | ٨ |
| الأجهزة الإلكترومغناطيسية | ٦٠-٥٠ | ٣٠-٢٠ |
| مفتاح القطع | ٥٠ | ١٠ |
| مرحلات وبادئات كهرومغناطيسية | ٦٠-٥٠ | ٤٠-١٥ |
| محولات سبائك الحديد | ٥٠ | ٥٠٠ |
| الأحمال المغذاة الحساسة | ٦٠ | ١٣٠ |

■ جدول (١) قائمة بحساسية الأجهزة الكهربائية لانخفاض الجهد.

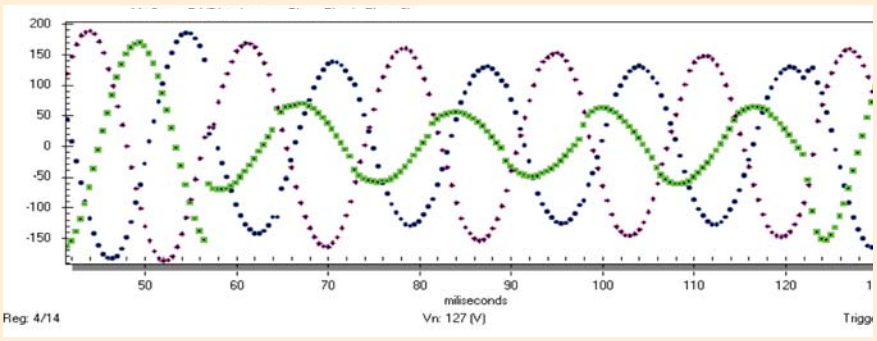
يؤدي انخفاض الجهد السريع إلى حدوث مشاكل فنية للعديد من التجهيزات الكهربائية، مثل: متحكمات السرعة في المحركات الكهربائية، وأجهزة التحكم في العمليات الصناعية، وفي الحواسيب . ويوضح الجدول (١) قائمة بحساسية بعض الأجهزة لانخفاض الجهد السريع.

### ● ارتعاش الجهد

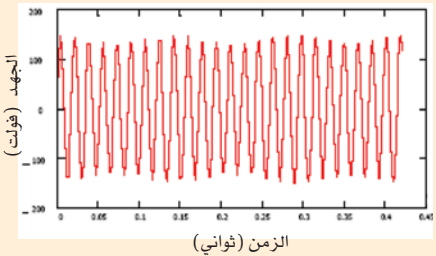
يعرف ارتعاش الجهد (Voltage Flicker) بأنه تغيرات صغيرة تحدث في مستويات الجهد بترددات أصغر من ٢٥ هرتز. من أهم أسباب ارتعاش الجهد: تغيرات الأحمال




■ شكل (٤) مثال على انخفاض الجهد السريع.




■ شكل (٥) مثال على قفز زاوية الطور الثاني لأحد المحولات بمقدار خمسة عشر درجة.




■ مثال على ارتعاش الجهد.

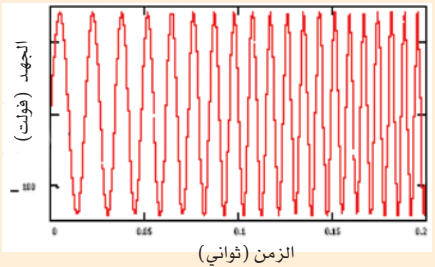
السريعة خاصة في الأفران الكهربائية واللحام الكهربائي، ومع أنه لا تحدث أضرار على الأجهزة الكهربائية والإلكترونية بسبب ارتعاش الجهد إلا أنه يعد مزعجاً؛ لأن تأثيره يظهر بشكل واضح على نظم الإضاءة؛ مما يسبب إزعاجاً للعين.

● **تغيرات التردد**

تعمل كل منظومة كهربائية وفق تردد خاص بها، فمثلاً تعمل المنظومة الكهربائية السعودية على تردد ٦٠ هرتز، كما تعمل المنظومة الكهربائية الأوروبية على تردد مقداره ٥٠ هرتز. بينما يكون التردد في المنظومات الكهربائية الضخمة مثل المنظومة الأوروبية مستقراً بشكل كبير، ونادراً ما يكون هناك انحراف عن التردد الأصلي، فإن المنظومات الصغيرة - خاصة التي يتم تغذيتها من مولد أحادي في الموقع ( توليد معزول) - من انحرافات بالتردد، والتي من الممكن أن تسبب أضراراً للأجهزة الإلكترونية والكهربائية وخاصة المحركات. يوضح الشكل (٦) حالة من حالات تغيرات التردد.

● **التوافقيات**

تعرف التوافقيات بأنها موجات دورية تحدث للجهد ( الفولتية) أو التيار، تحدث بترددات




■ شكل (٦) مثال على تغيرات التردد.

من مضاعفات تردد الموجة الأساسية، بحيث تكون من مضاعفات ٦٠ هرتز كما هو الحال في المملكة العربية السعودية والولايات المتحدة الأمريكية، أو من مضاعفات ٥٠ هرتز كما هو الحال في أوروبا.

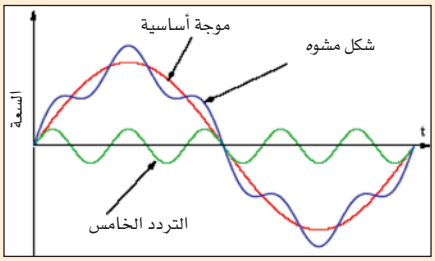
حينما تتراكب (Superimposed) الموجات التوافقية مع الموجة الأساسية سواء في الجهد أو في التيار القادم من نظام التغذية الكهربائية؛ يحدث تشوه في الموجة، كما هو موضح في الشكل (٧). ويمكن القول بأن التشوه الناجم عن التوافقيات بمثابة الانحراف للجهد أو التيار من الموجة الدورية المثالية، ويظهر ذلك حينما تتم إضافة مضاعفات قيمة الأعداد الصحيحة للتردد الأصلي للجهد أو التيار، ينشأ تشوه التوافقيات أساساً من أجهزة الحاسب الآلي، وأجهزة القوى الإلكترونية مثل: مقومات التيار (Rectifiers)، وأجهزة التحكم في سرعة المحركات الكهربائية (Adjustable Speed Drive – ASD)، حيث يتسبب في حدوث الأعطال للحواسيب، وارتفاع في درجة حرارة المحولات والمحركات والكابلات الكهربائية، إضافة إلى ارتفاع مستوى الضوضاء. كما تؤثر التوافقيات على أجهزة العرض مثل التلفزيونات، وتعمل على حدوث أخطاء في أجهزة القياس الإلكترونية.

■ **أسباب نشوء التوافقيات:** ومن أهمها:

- **الأحمال غير الخطية:** والتي يتغير فيها شكل موجات التيار والجهد المغذي لها إلى أشكال غير دورية، مثل الحواسيب والمحركات ذات السرعات المتغيرة المستعملة بكثرة في المكيفات، وكذلك وحدات الفلورسنت المستعملة في الإضاءة، إضافة إلى طابعات الليزر وأجهزة الفيديو.

- **أجهزة اللحام بالقوس** (Arcing Devices): وتعد من أشهر الأجهزة التي تنتج توافقيات الجهد.

- **الدوائر المغناطيسية:** مثل المحولات التي تنتج




■ شكل (٧) مثال على كيفية تشوه الموجة.

موجات مشوهة وخاصةً حين يعمل قلب المحول في المنطقة غير الخطية له.

- **أجهزة القوى الإلكترونية:** وتنتج أشكال غير دورية ومشوهة للموجات مثل أجهزة تقويم التيار المتُحكم بها بالسليكون الثيراستورات (Thyristors) تنتج أشكال غير دورية ومشوهة للموجات.

■ **التوافقيات في نظم الاضاءة:** وفيها يعمد مستهلكو الكهرباء إلى استبدال وحدات الإضاءة التقليدية بأخرى عالية الكفاءة مثل لمبات الإضاءة المدمجة، وذلك رغبة في ترشيد استهلاك الكهرباء، وكذلك تبديل البالاست المغناطيسي (Magnetic ballast) بأخر إلكتروني. وتعد وحدات الإضاءة المكونة من لمبات التفريغ ولمبات الفلورسنت من مسببات توافقيات التيارات؛ حيث تتعدى التوافقية من الدرجة الثالثة أكثر من ١٠٠٪؛ مما يجعل المحايد يقوم بنقل المجموع الجبري للتوافقية الثالثة في المنظومة ذات الأطوار الثلاثية وبذلك ترتفع درجة حرارة المحايد - خاصة - إذ لم يتم تصميمه بطريقة تسمح بتحمل مثل هذه التيارات.

■ **التوافقيات في المحايد:** وفيها يكون التيار في المحايد عبارة عن المجموع الجبري للتيارات المارة بالأطوار الثلاثة الأخرى، وذلك في النظام الكهربائي ثلاثي الطور، (Three-phase system) والذي تم عمله على شكل حرف (Y) وحينما تكون التيارات الدورية المارة في الأطوار الثلاثة في حالة اتزان؛ فإن

المجموع الجبري لها سوف يكون صفراً في أي نقطة داخل المحايد وكذلك في أي وقت. ولكن مايحدث في معظم الأحيان أن التيار ليس صفرياً في المحايد؛ لعدم اتزان الأحمال على الأطوار الثلاثة الناتج من تغيرات الأحمال المغذاة، وفي معظم الأحيان وحتى إن لم يكن صفرياً - يكون ذا قيم صغيرة لاتقارن بالتيار المار بالطور، وفي أحيان أخرى يكون فيه التيار المار بالمحايد عالياً جداً عندما تكون هناك نسبة كبيرة من التوافقيات.

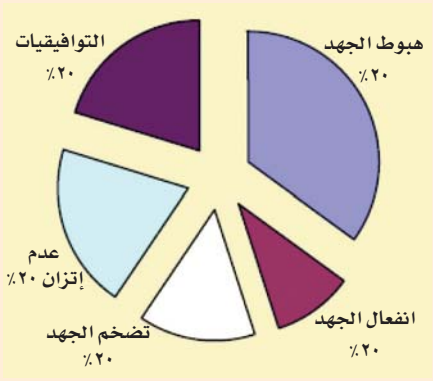
■ **تاثيرات التوافقيات:** ومن أهمها:

- **التأثير على الموصلات** (Impact on Conductors): حيث إنه كلما مر التيار التوافقي في موصل ما، سوف يقود إلى زيادة في فقد الكهرباء، وكذلك يرفع درجة حرارة الموصل.

- **التأثير السطحي** (Skin Effect): ويكون بسبب أن التيار المتناوب ( المتردد ) يسري في السطح الخارجي للموصل وهذا ما يعرف بالأثر السطحي، حيث يظهر بشكل واضح في الترددات العليا. وعادة يتم إغفاله، ولكن عندما يزداد التردد ويصل إلى أعلى من ٣٠٠ هرتز (التوافقية الخامسة فما فوق)، فإنه يؤدي إلى زيادة في فقد الطاقة الكهربائية إضافة إلى رفع درجة حرارة الموصلات؛ لذا يتعين على المصممين أخذ هذا في الاعتبار عند تصميم الكابلات ورفع سعتها لكي تستوعب الأثر السطحي. أما إذا كانت الترددات منخفضة (٦٠ هرتز) كالتي تعمل عليها الشبكة السعودية، فإن التردد ويمكن إهماله.

- **التأثير على المواسعات** (Impact on Capacitors): وينشأ عندما يكون الجهد المطبق على طرفي المواسع ذي شكل موجي مختلف عن الشكل الموجي للتيار؛ وذلك حينما يحمل المواسع تياراً مشوهاً من التوافقيات؛ مما ينجم عنه فقد الطاقة الكهربائية من خلال العازل الذي يفصل بين طرفي المواسع.

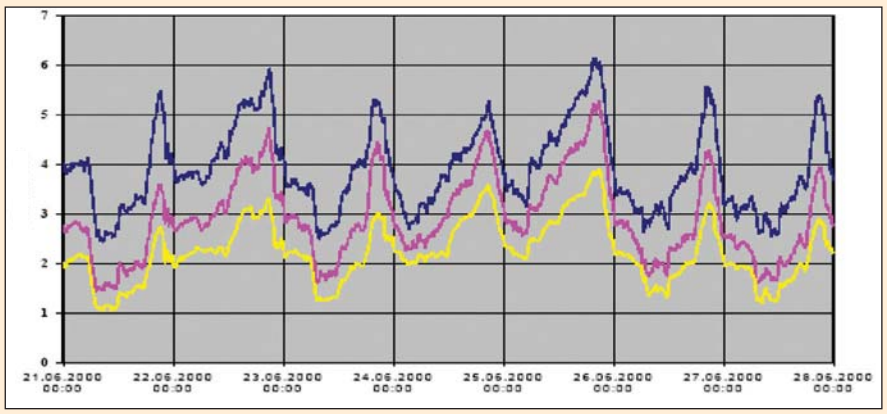
- **التأثير على محولات القوى** (Impacts on Power Transformer): ويؤدي بشكل كبير في زيادة حرارة المحولات؛ لذا يتعين على مصممي المحولات أن يأخذوا في الاعتبار أثر الترددات العالية الناشئة من التوافقيات، وللتقليل من هذا الأثر يجب عليهم التبديل المستمر للكابلات، أو حتى تبريدها. وبشكل عام فإنه عندما يزيد مستوى التوافقيات عن ٥٪ أعلى من الموجة الأصلية فإنه يتعين تحميل المحول بأقل من طاقته القصوى عليها؛ لتلافي ارتفاع درجة الحرارة. وبشكل عام فإن الأضرار التي تحدث في المحول نتيجة التوافقيات تشمل زيادة فقد الطاقة (Harmonics Power Loss–HPL)، وزيادة الفقد الناشيء من تيارات إيدي (Eddy) ومن زيادة مرور الدفق المغناطيسي في ملفات المحول، وكذلك زيادة الفقد الناتجة من قلب المحول (Core Losses).




■ نسب مشاكل جودة الكهرباء حسب النوع.

من جانب آخر تعمل التوافقيات على تشوية موجة الجهد في المحول، حيث يزيد الإجهاد على عوازل المحول، ويحدث تداخل مع دوائر الاتصالات الكهربائية، إضافة إلى ظهور رنين في الجهد.

- **التأثير على شبكة الكهرباء:** حيث دلت القياسات العديدة التي تمت على الشبكة الكهربائية أن هناك علاقة بين استعمال أحمال كهربائية بعينها - مثل أجهزة التلفزيون - وظهور التوافقيات في الشبكة . كما أظهرت القياسات على المدى القصير والمتوسط ظهور أثر تراكمي من التوافقيات الناشئة من هذه الأجهزة، ويوضح شكل (٨) التوافقية الخامسة، والتي تم قياسها على جهود مختلفة من الجهد ١١٠ كيلوفولت وجهد ٣٠ كيلو فولت وكذلك الجهد ٤٠٠ فولت، حيث أظهرت القياسات زيادة كبيرة في التوافقية الخامسة في المساء هذا الوقت يصادف بداية مشاهدة التلفزيون - وتتناقص قيمة التوافقية في نهاية المساء حوالي الساعة العاشرة مساء، ويظهر الشكل كذلك انتقال التوافقية الخامسة من مستوى الجهد المنخفض إلى أعلى منه حتى يصل للجهد ١١٠ كيلو فولت.




■ شكل (٨) مثال على التوافقيات الخامسة في نظم توزيع الكهرباء في النمسا على مستوى جهد مختلفة من ٤٠٠فولت و٣٠ كيلوفولت ١١٠ كيلوفولت على مدى أسبوع.

## مراقبة جودة الكهرباء

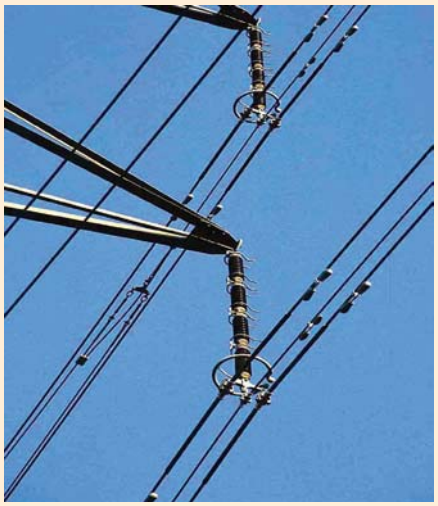
يعتقد المستهلك ـ أحياناً ـ أن أجهزته تعمل بشكل طبيعي، وأنه لا مشاكل تعتريها، لكن لا يمكن التأكد من ذلك بدون المراقبة المستمرة لاستهلاك هذه الأجهزة للكهرباء (Power Monitorin). وفي دراسة أجريت بواسطة معهد أبحاث القوى الكهربائية في الولايات المتحدة خلص الباحثون إلى أن أكثر من ٨٠٪ من مشاكل جودة الكهرباء تحدث داخل منشأة المستهلك، وبناء على هذا فإن معظم شركات الكهرباء تنصح المستهلكين مالكي المنشآت الصناعية المتوسطة والكبيرة بتركيب أجهزة مراقبة جودة الكهرباء داخل منشأتهم؛ بهدف رفع درجة الاعتمادية للمنظومة، وإلى إدارة أفضل لاستهلاك الكهرباء، والتخطيط الجيد لصيانة المنظومة، وخفض تكاليف تشغيل المنظومة الكهربائية.

يعمد المهندسون في مرحلة التصميم ـ عادة ـ إلى عمل محاكاة عبر الحواسيب للمنظومة الكهربائية وقدرة تحملها على المشاكل العديدة التي قد تصيبها من مشاكل جودة الكهرباء. وفي حالة حدوث مشكلة فإنه يتم اللجوء إلى مراقبة الشبكة لتحديد ماهية المشكلة أولاً، ومن ثم توصيفها بشكل دقيق وتوصيف الأحمال التي تضررت من جراء هذه المشكلة. وتتم عملية المراقبة عبر أجهزة متقدمة تستعمل لغرض وضع علامات قياسية لأداء المنظومة، ووضع مؤشرات الاعتمادية على الشبكة، ووضع أولويات لمشاكل جودة الكهرباء التي يتعين حلها بحسب ماتسمح به الميزانية من استثمارات رأسمالية، وبالتالي تحديد الأجهزة التي سوف يتم تركيبها للتخلص من مشاكل جودة الكهرباء، حيث إن هناك متطلبات يجب مراعاتها لعمل مراقبة الجودة لكل نوع من أنواع مشاكل الجودة.

وتوضع هذه الأجهزة عادة في محطات التحويل (Substations) وفي أماكن ربط العميل مع شركة الكهرباء، وكذلك بجانب الأحمال. وتختلف فترة القياس بحسب طبيعة المشكلة، حيث يمكن أن تكون قياساً لحظياً أو ذات فترة طويلة، علماً أن أي جهاز يستعمل للمراقبة يجب أن يشتمل على برمجيات لجمع البيانات وتصنيفها، وكذلك على قاعدة للبيانات لتخزين البيانات المجمعة و برمجيات لتحليل البيانات ورسم النتائج.

## مواصفات جودة الكهرباء

قامت العديد من دول العالم بإلغاء الاحتكار التكاملي الرأسي ـ والذي كان يشمل قطاعات التوليد والنقل والتوزيع وخدمات العملاء في شركة واحدة ـ نتيجة للتغيرات الاقتصادية خلال العقود القليلة الماضية. كما بدأت عملية فصل التوليد لعدة شركات متنافسة، وكذلك التوزيع وخدمات العملاء ومن هنا بدأت عملية تحديد المسؤول عن جودة الكهرباء تصبح أكثر صعوبة؛ لتعدد الأطراف بدلاً من الاقتصار على طرفين كما كان سابقاً، وهما: العميل ومرفق الكهرباء الاحتكاري. ونتيجة لذلك ـ ولتطوير طريقة للتواصل وتبادل المعلومات بين جميع الأطراف ـ فقد تزايدت الحاجة لإيجاد مصطلحات مشتركة



لتوصيف مشاكل الجودة، بحيث تكون مفهومة للجميع، ومن هنا بدأت العديد من الجمعيات المهنية تطوير مواصفات لجودة الكهرباء لكي تساعد في تعاون جميع الفرقاء من عملاء الكهرباء وشركات الكهرباء وكذلك المصنعين للأجهزة الكهربائية؛ وذلك بغية تشكيل أسس مشتركة لتقييم جودة الكهرباء، سواء من حيث أداء شبكة الكهرباء أو من حيث أداء الأجهزة الكهربائية المرتبطة بالشبكة. وسوف تساعد هذه المواصفات على تفادي الالتباس بين جميع الفرقاء وفي وصف وتصنيف نتائج المراقبة والقياسات، كما تسمح بالتحليل الإحصائي للبيانات الواردة من مصادر متعددة، وتسهيل الاتصال حينما يتم توصيف أحد مشاكل الجودة.

تساهم المواصفات التي تم تطويرها في تثقيف الجميع ووضع مقاييس للأداء، وتطوير حلول جديدة لمشاكل الجودة . حيث يتمثل دورها في الوصف الدقيق لأداء المنظومة الكهربائية، ووضع الطرق الإجرائية الناجعة في حل مشكلات جودة الكهرباء، إضافة إلى تحديد المسؤوليات بين جميع الفرقاء.

من جانب آخر يجب أن يكون هناك توازن في الاحتياجات المختلفة للعملاء من الكهرباء الموزعة ـ فقد يكون هناك تفاوت في حاجات الأحمال لأنواع مختلفة من الأجهزة الكهربائية بعضها من حيث الحساسية ـ وعلى أساس ذلك يتم تحديد الجودة والسعر، وبما أن رفع مستوى الجودة بشكل كبير سوف يزيد من سعر الكهرباء دون فائدة لقطاع كبير من المستهلكين؛ فإنه يتم توزيع الكهرباء من ضمن مواصفات مقبولة وعلى الأحمال الخاصة والحساسة بهدف رفع مستوى جودة الكهرباء داخل منشأتها للوصول إلى النقطة التي يتحقق معها مستوى مقبول من الجودة مع مستوى مقبول من سعر الكهرباء.