

Harmonik Bozulmaların Şebeke Kısa Devre Kapasitesi Kapsamında Değerlendirilmesi

EMPEDANS – KISA DEVRE AKIMI – GERİLİM HARMONİĞİ

Elk. Elo. Müh. H. Mert Dirik
hamza.dirik@gmail.com

“Bültenimizde daha önceki yazımızda “Güç kalitesi, standartları ve akım bozulması” konusu işlenmişti. Bu sayıda harmonik bozulmalar ve şebeke kısa devre üzerine etkileri açıklanmaya çalışılacaktır.”

Konu “harmonikler” olduğunda belki de en çok duyduğumuz önermeler şunlardır:

Gerilim harmonikleri, akım harmonikleri tarafından üretilir.

Şebeke zayıf olduğu için harmonikler yüksektir.

Aynı karaktere sahip iki makine/hat farklı harmonik seviyeleri oluşturuyor.

Bu önermeleri çoğaltmak mümkündür. Fakat genel olarak bu üç önerme işletmelerde en çok duyduklarımız olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu önermelerin doğru olup olmadığı ve doğrusa nasıl doğru oldukları hakkında

bir beyin fırtınası yapmak bu makalenin asıl amacıdır. Makalede yukarıda sayılan önermelerin ve bu önermelere benzer diğer başka önermelerin neden ve nasıl oluştukları temel elektrik kanunları kullanılarak olabildiğince yalın bir şekilde açıklanmaya çalışılacaktır.

Önermelerin doğruluğunu ve nedenselliğini tartışmadan önce “harmonik” denen fenomenin ne olduğu ve nasıl türediğini açıklamaya çalışalım. Harmonik tanım olarak şebeke temel frekansının (50Hz veya 60Hz) tam sayı katları şekilde olan sinüsoidal periyodik sinyaller olarak tanımlanmaktadır. “n” harmonik derecesi ve “fn” temel şebeke frekansı olmak üzere harmonik frekans(fh);

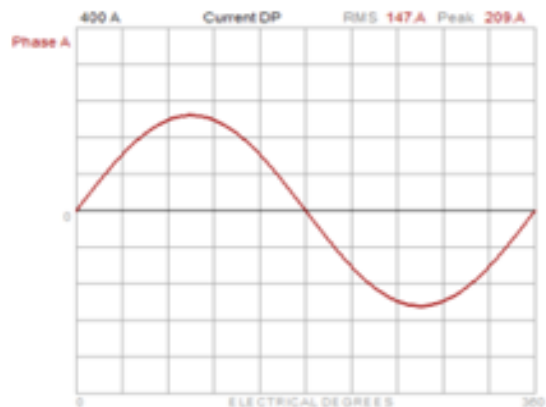
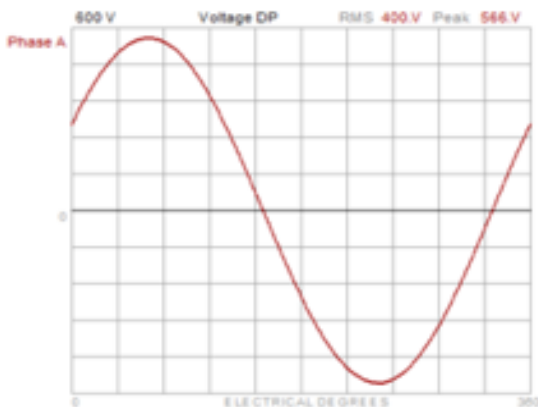
$$f_n = n \cdot f_n$$

olarak tanımlanır. Yani Türkiye şebeke güç frekansı 50Hz olduğu için 3. Harmonik 150Hz, 5. Harmonik

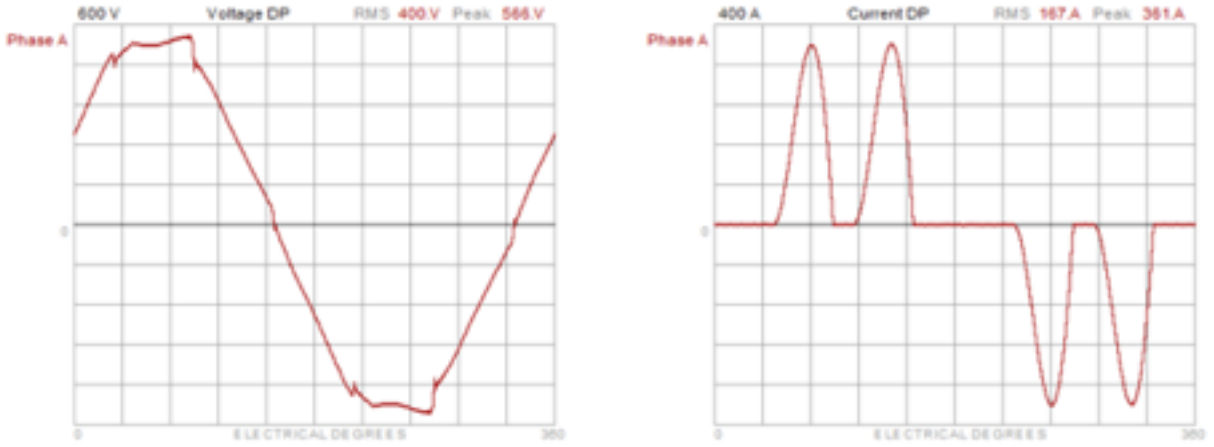
250Hz’lik bir frekansa sahiptir.

Harmonik ve harmonik frekansı tanımını yaptıktan sonra şimdi de harmoniklerin nasıl oluştuğuna bakalım. Bunun için öncelikle “lineer” ve “non-lineer” yük kavramlarının ne olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Şekil – 1’de lineer bir yüke ait osiloskop çıktıları verilmiştir.

Şekil – 1’de lineer bir yüke ait olan gerilim sinyali sol tarafa, akım sinyali ise sağ tarafa gösterilmektedir. Lineer yük, kendisine uygulanan gerilim ile aynı dalga formuna sahip bir akım çeken yük olarak tanımlanır. Yükün maruz kaldığı gerilim ve şebekeden talep ettiği akım arasında herhangi bir faz açısının olup olmaması yükün lineer niteliğini değiştirmez. Yani yük akımında örneğin mıknatıslanma akımı gibi bir reaktif bileşenin bulunması veya yükün saf rezistif olması onun lineer olma niteliğini değiştirmez.



Şekil – 1: Lineer Yük Gerilim ve Akım Osiloskop Grafiği



Şekil – 2: Non-Linear Yük Gerilim ve Akım Osiloskop Grafiği

Şekil – 2’de ise non-lineer bir yüke ait osiloskop çıktıları verilmiştir.

Yukarıda Şekil – 2’de non-lineer bir yüke ait olan gerilim sinyali sol tarafa, akım sinyali ise sağ tarafta gösterilmektedir. Non-lineer yük, kendisine uygulanan gerilim ile aynı dalga formuna sahip olmayan bir akım çeken yük olarak tanımlanır. Yükün maruz kaldığı gerilim ve şebekeden talep ettiği akım arasında herhangi bir faz açısının olup olmaması yükün non-lineer olma niteliğini değiştirmez.

İşte non-lineer yüklerin şebekeden çekmiş oldukları sinüsoidal formdan oldukça uzak olan bu kompleks formdaki akım sebebiyle “akım harmonikleri” oluşmaktadır. Detay için Fourier Analizi’ ne başvurulabilir, bu analizin detaylarına yazıda değinilmeyecektir.

Bilindiği gibi bir empedans üzerinden geçen akım o empedans üzerinde bir gerilim düşümü oluşturur. Elektriğin en temel kanunu olan bu kanun genellikle temel frekans bazında düşünülmektedir. Fakat aynı kanun her frekans bandı için de geçerlidir. Yani temel frekansın dışında oluşan frekanslarda da bir empedans üzerinden geçen akım o empedans üzerinde bir gerilim düşümü oluşturur. Kısaca tanımlayacak olursak, belirli frekans-taki akım harmonikleri bir empedans üzerinden geçerken o frekansta bir

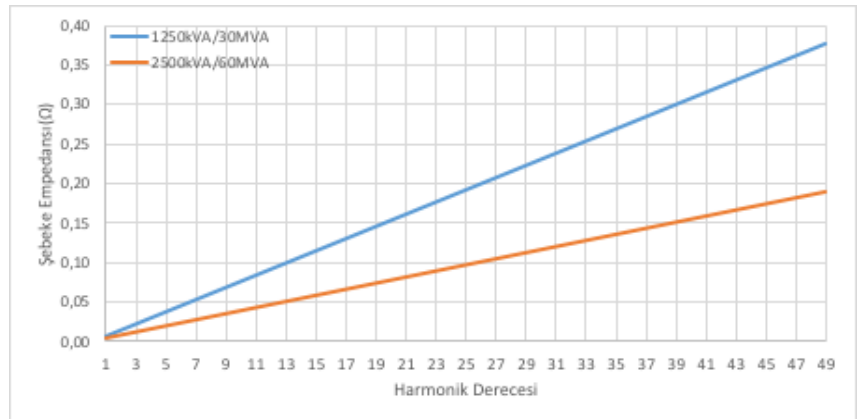
“gerilim düşümü” oluşturur. Bu gerilim düşümüne “gerilim harmoniği” adı verilir.

Yani şu halde varılması gereken ilk sonuç şudur: Daha düşük empedansa sahip olunan durumlarda oluşacak olan gerilim düşümü ve buna bağlı olarak gerilim harmoniği daha düşük bir seviyede olacaktır. O halde gerilim harmoniğinin düşük bir seviyede olması için arzu edilen şey empedans değerinin mümkün olduğunca küçük bir değere sahip olmasıdır.

Empedansın küçük veya büyük bir değere sahip olması en geniş kapsamda yani şebeke boyutunda düşündüğümüzde “güçlü kaynak” veya “zayıf kaynak” tanımlarını da beraberinde getirmektedir. Şebekeden kasıt, bağlı olduğumuz enterkonnekte sistem ve tesislerdeki transformatör veya generatörlerdir. Enterkonnekte sistemimi-

zin teorik olarak sonsuz güçte olduğunu varsayabiliriz fakat tesis bazında konuyu ele aldığımızda şebekemizin “güçlü” veya “zayıf” olması transformatörümüz veya generatörümüzün kısa devre akımıyla alakalıdır. “Güçlü kaynak” düşük empedansa ve buna bağlı olarak da yüksek kısa devre akım kapasitesine sahip şebeke anlamına gelmekteyken, “zayıf kaynak” tam aksine yüksek empedansa ve buna bağlı olarak da düşük kısa devre akım kapasitesine sahip şebeke anlamına gelmektedir. İlgi alanımız “harmonikler” olduğu için fabrikamızdaki “güçlü kaynak” ve “zayıf kaynak” kavramlarını da bu bağlamda değerlendirebiliriz. Aşağıda iki farklı güçteki transformatörün her bir harmonik derecesi için sahip olduğu empedans değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.

Grafikte mavi ile gösterilen



Grafik – 1: Güçlü ve Zayıf Kaynak Empedansı – Harmonik Derecesi

1250kVA-Uk:6%, turuncu ile gösterilen 2500kVA-Uk:6% değerindeki transformatörlere aittir. 1250kVA'ya ait kısa devre akımı yaklaşık 30,07kA, 2500kVA'ya ait kısa devre akımı ise 60,14kA'dır. Harmonik dereceleri yani frekans arttıkça daha yüksek güce sahip transformatör diğerine nazaran daha düşük empedans değerleri almıştır. Transformatörler söz konusu olduğunda kısa devre empedansı 5-6% düzeyinde olanlar "güçlü kaynak", daha yüksek olanlar ise "zayıf kaynak" olarak tanımlanabilir.

Yukarıda sözel olarak ifade ettiğimiz düşük empedansa sahip olan yani "güçlü kaynak"lardaki gerilim düşümleri/gerilim harmonikleri daha düşük olacaktır önermesi grafikte de açıkça görülmektedir. Örnek olarak 13. Harmonik derecesinde 1250kVA transformatöre ait empedans yaklaşık olarak 0,1 Ω değerinde, yine aynı harmonik derecesinde 2500kVA transformatöre ait empedans yaklaşık olarak 0,05 Ω değerindedir.

Grafik – 1'i baz alarak bir örnek oluştursak, 13. Harmonik değeri 20A olan bir tesis için eğer transformatör 1250kVA, 34,5/0,4kV, Uk:6% ise oluşacak olan 13. Gerilim Harmoniği değeri 3,46V; eğer transformatör

2500kVA, 34,5/0,4kV, Uk:6% ise oluşacak olan 13. Gerilim Harmoniği değeri 1,73V olacaktır. İndüklenen gerilim harmoniği veya diğer bir tabirle 13. Harmonik'teki gerilim düşümü, transformatör gücünün iki katına çıkmasıyla birlikte, yarı yarıya azalmıştır.

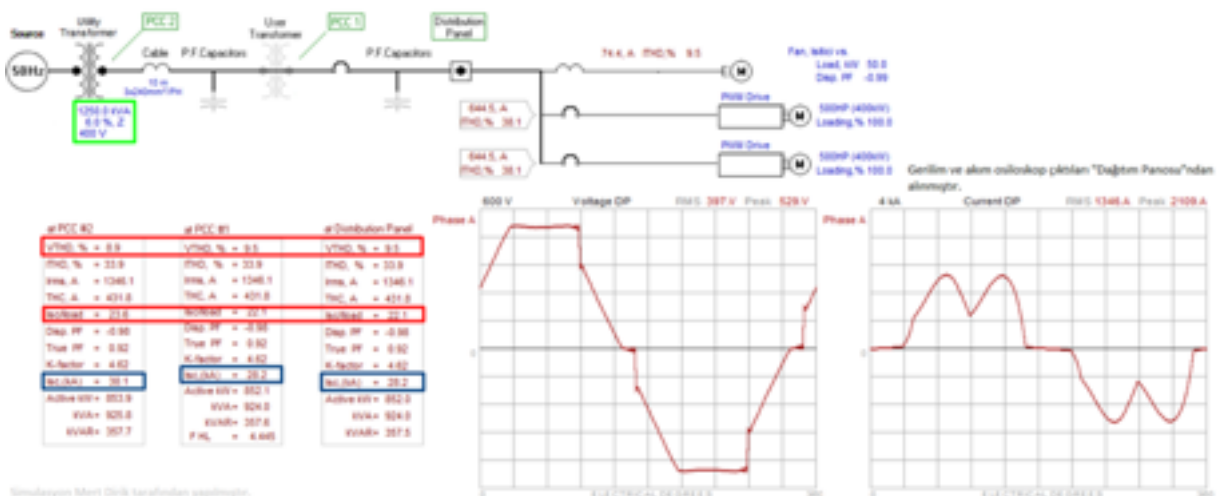
Aynı karşılaştırma transformatör ve generatör arasında da yapılabilir. Tesislerde enerji kesintisinin telafisi için kullanılan generatörlerde de subtransient reaktansı 10-18% arası olanlar "zayıf kaynak" olarak tanımlanabilir. Transformatörlerle karşılaştırıldıklarında generatörler çok daha yüksek kısa devre empedansına(X"d) sahip olduğu için generatör tabanlı çalışmalarda gerilim harmonikleri çok yüksek değerlere çıkmaktadır. Literatürde "ada modu" çalışma olarak isimlendirilen ve tesislerin generatör üzerinden beslendiği durumlarda gerilim harmoniklerinin yaklaşık iki katına kadar çıktığı bu zamana kadar yapılmış olan çalışmalarda görülmüştür. Hem transformatörler hem de generatörlerde kısa devre kapasitesi ve gerilim harmoniği arasındaki ilişki simülasyonlarla daha belirgin şekilde gösterilmiştir.

Simülasyonu yapılan 2 x 400kW Hız Kontrol Sürücüsü ile sürülen mo-

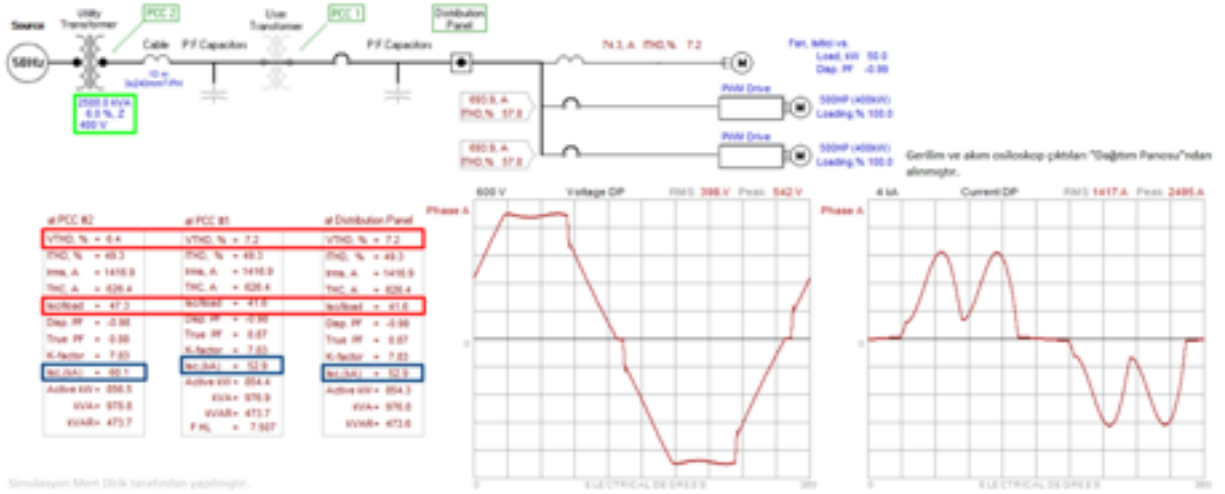
torlar ve 50kW toplam güce sahip olan fan, ısıtıcı gibi lineer yükler belirli güçteki transformatör ve generatörler ile beslenmiş ve bir güç kalitesi analizinde araştırılan temel parametreler karşılaştırılmıştır. Osiloskop çıktıları ve ölçülen parametre değerleri "Distribution Panel"den alınmıştır. 50kW'lık lineer yükler sistemi seri/paralel rezonansa getirecek olan frekansın ötelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Böylece tüm argümanlar seri/paralel rezonans ihtimalinin oldukça azaldığı durumlar için sunulmuştur. Rezonans anındaki devre analizi çok daha karmaşık bir hal alabilir.

Yükler 1250kVA – Uk:6% transformatör üzerinden beslendiğinde sekonder kısa devre akımı yük tarafında 28kA, gerilim harmoniği(THDv) oranı 9,5% ve akım harmoniği(THDi) oranı 33,9% olarak ölçülmüştür. (Şekil-3)

Şekil-4'te Yükler 2500kVA – Uk:6% transformatör üzerinden beslendiğinde sekonder kısa devre akımı yük tarafında 42kA, gerilim harmoniği(THDv) oranı 7,2% ve akım harmoniği(THDi) oranı 49,3% olarak ölçülmüştür. Dikkat edilirse transformatör gücü ve kısa devre akımı artmış, empedans düşmüş ve buna bağlı olarak kaynağın güçlenmesi neticesinde beklendi-



Şekil – 3: 1250kVA – Uk:6% Transformatör Üzerinden Beslenen Bir Fabrika



Şekil - 4: 2500kVA – 6% Transformör Üzerinden Beslenen Bir Fabrika

ği gibi gerilim harmoniği(THDv) oranı düşmüş fakat akım harmoniği(THDi) oranı yükselmiştir. Bu durum oldukça ilginçtir. Fakat bu ilginç durumun açıklanması bu makalenin kapsamını büyüteceğinden dolayı başka bir zamana bırakılmıştır.

Şekil-5'te Yükler 1250kVA – X"d:14% generatör üzerinden beslendiğinde sekonder kısa devre akımı yük tarafında 12,5kA, gerilim harmoniği(THDv) oranı 20,7% ve akım harmoniği(THDi) oranı 32,5% olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi fabrikanın Şekil - 3'te 1250kVA transformör üzerinden beslendiği duruma göre

kısa devre akımı düşmüş, empedans yükselmiş yani kaynak zayıflamış ve gerilim harmoniği(THDv) oranı aşırı şekilde yükselmiştir. Ayrıca gerilim dalga formu incelendiğinde sinüs sinyal formundan oldukça uzakta olduğu açıkça görülmektedir. Bunun sebebi generatör sac paketlerinin ve sargılarının tam sinüs dalgası oluşturacak biçimde yerleştirilememesinden kaynaklanmaktadır.

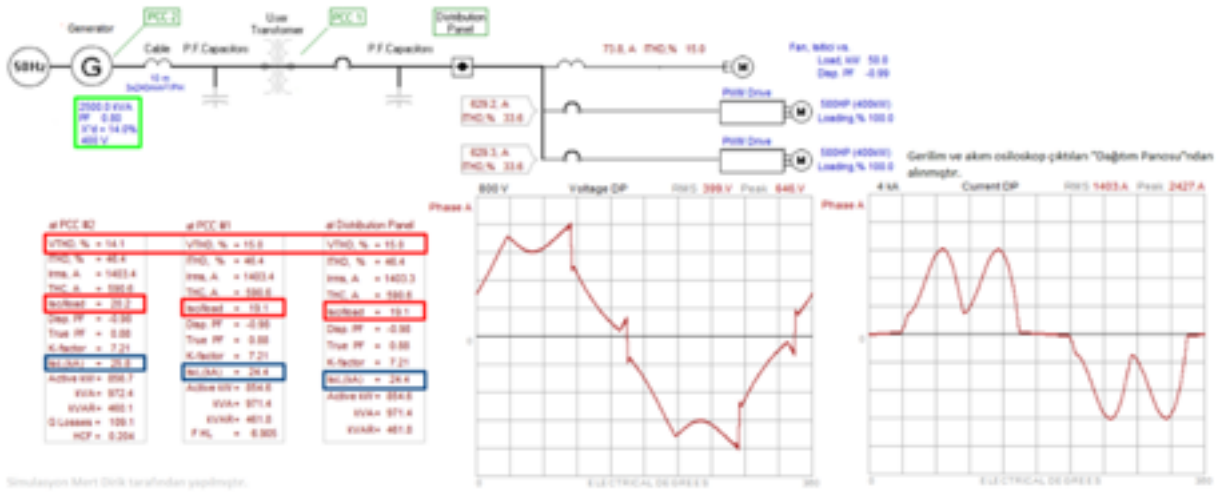
"Ada modu" çalışma durumunda yüklerin maruz kalacağı bozuk gerilim istenmeyen pek çok olaya sebebiyet verecektir. O yüzden özellikle "ada modu" çalışma zamanlarında işletme-

lerde ek önlemlerin alınması kaçınılmaz bir hal almaktadır.

Şekil-6'da Yükler 2500kVA – X"d:14% generatör üzerinden beslendiğinde sekonder kısa devre akımı yük tarafında 26kA, gerilim harmoniği(THDv) oranı 15% ve akım harmoniği(THDi) oranı 46,3% olarak ölçülmüştür. Dikkat edilirse generatör gücü ve kısa devre akımı artmış, empedans düşmüş ve buna bağlı olarak kaynağın güçlenmesi neticesinde beklendiği gibi gerilim harmoniği(THDv) oranı düşmüş fakat akım harmoniği(THDi) oranı yükselmiştir.



Şekil - 5: 1250kVA – X"d:14% Generatör Üzerinden Beslenen Bir Fabrika



Şekil – 6: 2500kVA – X'd:14% Generatör Üzerinden Beslenen Bir Fabrika

Simülasyon sonuçları aşağıdaki tabloda daha anlaşılır bir şekilde gösterilmiştir.

Tüm bu yazılanlardan genel olarak çıkarılacak olan sonuç, kısa devre kapasitesi veya kısa devre empedansı açısından şebeke/kaynak gücü, harmonik bozulmanın büyüklüğünü ve marjinal olarak da giriş güç faktörünü veya gerilim düşümünü etkiler. Giriş güç faktörü üzerindeki inceleme bu makalenin kapsamında değildir, başka bir makalenin konusu olabilir.

Düşük empedans ve yüksek kısa devre akımına sahip olan "güçlü kaynak/şebeke"lerde akım harmoniklerinin daha düşük oranda gerilim düşümü yani gerilim harmoniği oluşturacaktır. Bir tesisteki harmonik bozulma değerlendirirken genellikle şebeke kısa devre kapasitesi ile maksimum yük akımı arasındaki oran kullanılır. Yüksek kısa devre kapasitesi sahip olan sistemlerde özellikle TDD (Total Demand Distortion) limitleri daha

yüksektir. Bu da aynı zamanda hem şebekenin daha az bozulacağına hem de daha düşük bir gerilim bozulmasına işaret etmektedir.

Bu yazıda empedans, kısa devre kapasitesi ve gerilim harmoniği arasındaki ilişki ve bu bağlamda şebeke gücünün önemi belirtilmeye çalışılmıştır. Şebeke gücü ile akım bozulmaları arasındaki ilişkinin ve Toplam Talep Bozulması'nın detayları Mart 2023 tarihli 394.Sayılı bülteninde yayınlanmıştır.

Kısa Devre Kapasitesi vs. Harmonik İçerik İlişkisi (@Dağıtım Panosu)					
kVA - Z ya da X_d'	I_{SC} / I_L	I_{THD}	Total V_{THD}	TDD Limit	Total V_{THD} Umit (IEEE and IEC)
1250kVA - 6% Z Transformatör	22,1	33,9	9,5	8	8
1250kVA - 14% X_d' Generatör	9,8	32,5	20,7	8	8
2500kVA - 6% Z Transformatör	41,6	49,3	7,2	8	8
2500kVA - 14% X_d' Generatör	19,1	46,4	15	8	8

Tablo – 1: Kısa Devre Kapasitesi ve Harmonik İçerik İlişkisi