

Orsaken till effektpendlingar i konkrossar

- och vad man kan göra åt dom?

Sten Bergman, StonePower AB

Bakgrund

Under bergkrossning med framför allt konkrossar har man i många fall observerat stora effektpendlingar. Dessa blir extra stora när krossen dessutom är ansluten till ett svagt elnät. I dagsläget drivs krossar antingen med lokal el från dieselgenerator, direkt elanslutning mot elnät eller via s.k. växelriktare/frekvensomformare.

Pendlingarna, som kan uppgå till flera hundra Ampere (topp-till-topp) uppträder med låg frekvens (3-6 Hz) och är vanligt förekommande i de flesta anläggningarna. Där flera krossar är anslutna parallellt kan svängningarna uppträda synkront och i dessa fall uppstår även en lägre modulationsfrekvens.

I avsikt att komma till rätta med pendlingarna har SBMI tillsammans med krossbranschen, SBUF och Skanska drivit ett pilotprojekt sedan 2022. Avsikten med detta projekt är att studera om ett större Li-jonbatteri kan stabilisera systemet och sänka pendlingarna.

En viktig fråga är dock vad som egentligen orsakar pendlingarna och om batteri eller andra metoder skulle kunna förmå dämpa ut dessa? Denna rapport tar fasta på några aspekter kring varför de uppkommer och hur en stabilisering skulle kunna vara möjlig.

Asynkronmaskinens beteende vid laständringar

De krossar som studerats i utvecklingsprojektet har alla varit försedda med asynkronmotorer med märkeffekter upp mot 300 kVA. Maskinerna har varit mångpoliga och drivits med nätfrekvensen 50 Hz. Detta medför att det synkrona varvtalet hos krossarna då varit 300 rpm. För att krossen skall fungera som tänkt utnyttjas dess självregleringsförmåga, nämligen att när lasten ökar så ökar maskinens s.k. ”slip”. Dvs varvtalet minskar. Ett minskat varvantal svarar således mot ett ökande drivmoment och maskinen får en ny stabil arbetspunkt.

Asynkronmaskinen är dock beroende av en konstant och stabil spänningsförsörjning från elnätet. Momentet beror dessutom kvadratiskt av spänningen

Här kan man redan ana vad ett s.k svagt elnät skulle innebära. Ett sådant nät har alltför stor impedans och ökande last innebär en ökande ström. Drivspänningen till motorn minskar med ökande last genom ledningsresistansen men även initialt med ökande strömderivata pga ledningsinduktansen. När motorn ”sackar” för att få det ökande moment minskar samtidigt spänningen och därför uteblir momenttillskottet till krossen.

På grund av dessa två fenomen, varierande varvantal och en varierande drivspänning, som delvis motverkar varandra kommer både varvtalsvariationer och spänningsvariationer att uppvisa ett resonansbeteende. Även om momentvariationerna, som är naturliga pga krossningens natur kommer det elektromekaniska systemet att hamna i en självsvängning.

Frekvensen för denna självsvängning bestäms delvis av krossens tröghetsmoment och hur styv momentkurva motorn har. Denna beror både på motorn och elnätet. En tyngre kona i krossen skulle innebära större tröghetsmoment och därmed ge stabilare funktion, lägre resonansfrekvens och mindre svängningar.

Driftpunkten för stabil krossning bestäms av hur mycket krossen är lastad. Vid låg last är "slippet" lågt, vid hög last är "slippet" högt. Krossmotorns varvtal blir därför styrande för vilken frekvens som pendlingarna kommer att få. I praktiken kan man med en motor som har synkrona varvtalet 300 rpm säga att den oreglerade pendlingsfrekvensen troligen kommer att ligga mellan 3 - 6 Hz.

Denna pendling innehåller alltså intressant information om hur mycket krossen är belastad och skulle kunna ge värdefull information om den övervakades!
Låg belastning svarar mot hög frekvens och motsvarande låg frekvens svarar mot hög belastning.

Effektpendlingens dynamik och struktur

Genom den koppling som sker mellan mekanisk rotation (mekaniska momentet) och elektrisk drivning (elektriska momentet) kan man alltså påstå att resonansen har stark tendens att kunna bli självunderhållande. Det som skulle varit en enkel variation längs momentkurvan blir i stället en varierande momentkaraktistik i form av en hysteres-kurva. Typiskt för sådana olinjära fenomen är att s.k. "limit-cycle svängningar" brukar uppkomma.

Pendlingarna uppträder därför som en egenresonans i det elektromekaniska systemet kraftigt underhållen av den elektriska odämpade svängningen, framför allt i spänningen till motorn, som uppstår när reaktiva och kapacitiva strömmar är närvarande

Vad kan man göra åt pendlingen?

Eftersom pendlingen härrör från samspelet mellan spänning och varvtal borde åtminstone några av nedanstående metoder kunna vara av intresse;

1. Tillföra ström i lämpligt fasläge (utsläckning)
2. Förändra motorstyrning i växelriktaren

1 Utsläckning med kondensator/superkondensator/batteri

Denna teknik är den som föreslagits för praktiskt demonstration i SBMIs utvecklingsprojekt. Dvs att tillföra en ström i motfas till pendlingen via anslutning av ett yttre Li-jonbatteri.

En vanlig kondensator, som normalt finns anslutna till krossanläggningar har till uppgift att kompensera enbart för den reaktiva effekten. Genom detta minskas behovet av överförd ström, då den reaktiva strömmen så att säga pendlar mellan kondensator och motor, fast på rätt sida om elmätaren.

Om vi ser till en kondensatorlösning gäller att tillförd ström är lika med kapacitansen gånger den negativa spänningsderivatan. Om spänningen sjunker så tillför kondensatorn ström i proportion mot spänningssänkningen. Denna reglering fungerar både för normal-frekvensen 50 Hz, som för eventuella lågfrekventa pendlingar. En fråga som då uppkommer är hur stor behöver kondensatorn vara?

Om vi utgår från mätningen i Barkarby den 20 nov 2023 så ser man att strömmen pendlar mellan 475 och 800 A medan spänningen varierar mellan 391 och 398 V över en period, dvs 220 ms. Kapacitansen som behövs för att kompensera strömmen blir alltså $325 \cdot 0,22/7 = 10,2$ Farad. Det krävs då en ganska stor kondensator. Eller snarare en ”superkondensator”. (Små sådana kan fås i området 1 F till 100 F).

Som jämförelse. Ett Li-jonbatteri på ca 200 kWh, som kan leverera 400 A vid 400 V har en laddning om 2,25 miljoner Coulomb. Det ger en kapacitans för batteriet på drygt 5 625 Farad. (Alltså 500 ggr mer, än vad som svängningen behöver för att kunna kompenseras med en kondensator.)

Slutsatsen blir att om det finns superkondensatorer så skulle en sådan med energivärde minst 15 kWh och spänningsutgång på 400V vara en möjlig lösning. Fördelen med superkondensatorn är denna inte är av ”kemisk natur”, utan snarare fysikalisk. Detta har som konsekvens att livslängden går från några tusen cykler till miljoner cykler. Livslängden blir mångfalt större. Sett över några år är nog en superkondensator mer kostnadseffektiv och underhållet billigare.

Vilken responstid måste ett batteri ha?

Om vi antar att den mekaniska svängningen som uppstår i frekvensområdet 3 - 6 Hz skall kunna dämpas med en yttre påverkan, bör styrsystemet klara att hantera svängningar upp till minst systemets lägsta resonansfrekvens.

Om vi tar det lägsta värdet, 3,6 Hz (som uppträder vid hög last) så svarar detta mot vinkelfrekvensen 22,6 rad/sek. Responstiden bör i detta fall vara mindre än $1/22,6$, dvs 44 ms. Kompenseringen vid låglast (dvs 4,6 Hz) skulle på motsvarande sätt kräva en responstid på 35 ms eller lägre. Om vi antar att pendlingsproblemet bara uppstår vid hög belastning är responstidskravet alltså 44 ms eller snabbare.

(Northvolt uppgav att deras Li-jon batteri har en responstid kring 50 ms, vilket är något högre än önskvärt. Provet bör nog kunna utvisa vad som gäller?)

Responstiden är en avgörande faktor för att avgöra vilka av batteri-teknologierna som passar bäst för olika tillämpningar.

Batterier för industriella applikationer har hittills varit begränsade i både laddnings och urladdningskapacitet. Man talar om att batteriets strömkapacitet är 1C. Dvs man kan ladda och ladda ur batteriet med samma strömstorlek. Denna fås som kvoten mellan Energin/Spänningen. För batterier kring 250 kWh och 400 V är således 1C ca 625 A.

Nya **grafen-baserade superkondensatorer** kan dock leverera strömmar upp mot 6C. Alltså kan energilagrets storlek minskas med hela 80%, om det bara är strömmen som man är ute efter. En svängning om ca 200 A som kompenseras mha en super-kondensator behöver då enbart ett energiinnehåll om ca 15 kWh. Alltså närmare en femtedel av Li-jon batteriets storlek (vilket klarar 1C).

Man får dock tänka på att Kondensator, Superkondensator eller Li-jon batteri har olika funktionaliteter och framför allt kostnader. Systemlösningen kommer att avgöra den mest optimala lösningen.

- De första två är enbart till för att styra krossmotorn på ett optimalt sätt,
- hantera snabba effekttökningar (Peak-shaving)
- Dämpa eventuella resonanser.
- Li-jonbatteriet däremot kan förutom dessa funktioner även tjäna som ett lokalt energilager.

2 Förändrad motorstyrning genom justering i växelriktare

Hur fungerar en Asynkronmaskin En av de grundläggande egenskaperna hos en AC - induktionsmotor är att rotorn roterar med en långsammare hastighet än statorns roterande magnetfält. Denna skillnad i hastighet mellan rotorn och statorns magnetfält kallas slip.

Slip gör det möjligt för motorn att producera vridmoment - ju högre slip, desto högre är vridmomentproduktionen, men också, desto lägre är motorns effektivitet (i de flesta fall).

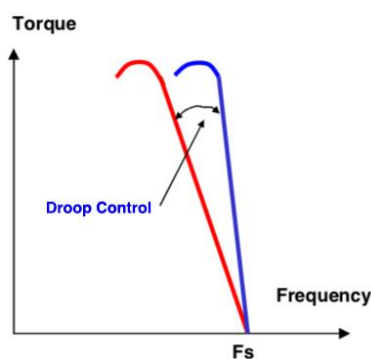
Droop reglering

För applikationer där lastdelning måste vara exakt och kontrollerbar, inkluderar vissa växelströmmar en funktion-vanligtvis kallad Droop-reglering, som reglerar motorns slip för att bättre säkerställa belastning. Så här fungerar det: Droop-regleringen förskjuter motorns vridmoment och frekvenskurva så att en ökning av vridmomentet orsakar en minskning av enhetens varvtal.

Styrsystemet kontrollerar alltså motorns vridmoment och om vridmomentet ökar utöver ett inställt värde (vilket indikerar att motorn tar för mycket belastning) minskar droop-kfunktionen utgångsfrekvensen eller spänningsnivån för enheten.

Rotorhastigheten har bromsat på grund av den ökade belastningen, och den minskade utgångsfrekvensen från drivenheten får statormagnetfältet också att minska i hastighet. Därför finns det en mindre skillnad mellan statorhastighet och rotorhastighet. Med andra ord reduceras slipet, vilket minskar motorns vridmomentproduktion.

Droopreglering kan dock fungera båda vägarna. Dvs minska varvtalet för motorn när lasten ökar (för att minska belastningsmängden på en överbelastad motor) eller öka motorvarvtalet när lasten minskar. I båda fallen med konstanthållen spänning. Denna tvåvägsmetod för att kontrollera belastningsdelning kallas ibland bipolär droop-reglering. Denna form används därför ofta för att reglera asynkronmotorer.



Vektorstyrning av asynkronmaskiner

Vektorstyrning, även kallad fältorienterad styrning (FOC), är en styrmetod för variabel frekvensdrift (VFD) där statorströmmarna i en trefas asynkronmaskin eller borstlös likströmsmotor identifieras som två ortogonala komponenter vilka kan visualiseras med vektorer.

En vektorkomponent definierar motorns magnetiska flöde, den andra vridmomentet. Frekvensomriktarens styrsystem beräknar motsvarande aktuella komponentreferenser från de flödes- och vridmomentreferenser som sedan styr frekvensomriktarens pulsbreddsmodulering.

Normalt används proportional-integral (PI) regulatorer för att hålla de uppmätta strömkomponenterna vid sina referensvärden. Pulsbreddsmoduleringen av frekvens-omformaren definierar omkopplingen av styrtransistorerna enligt statorspänningsreferenserna, som då utgör utsignalen från systemets regulator.

FOC utvecklades ursprungligen för högpresterande motorapplikationer, som krävs för att fungera smidigt över hela hastighetsområdet, generera fullt vridmoment vid nollhastighet och ha hög dynamisk prestanda inklusive snabb acceleration och retardation. Den blir dock alltmer attraktiv för tillämpningar med lägre prestanda, men också på grund av kostnad och reduktion av strömförbrukningen.

Enligt uppgift så styrs konkrossar med VFD enligt droop-strategin; låg belastning svarar mot låg matningsspänning. Därmed kan man uppnå en fördel, nämligen att vid låg belastning är spänningen också låg. Detta medför en lägre magnetisering och därmed lägre förluster samt också en lägre motorström. Drivande momentet hålls därmed nere.

Detta syns tydligt vid VFD-start, där motorströmmen kan begränsas till 400 A. (Se fig 1 nedan) Efter start, i tomgång, drar då motorn ca 80 A. När systemet ansluts till nätet (dvs VFD kopplas bort) får man en självreglerad motor med full matningsspänning. I detta läge ökar motorströmmen till drygt 130 A. Man kan ur denna mätning se att en VFD närmast halverar pendligen vid låglast. **Det vore önskvärt att genomföra mätningar med VFDn inkopplad under hela lastspektrumet.**

Det har föreslagits att VFDn för att kunna hantera effektvariationerna övergår i s.k. **kapacitiv styrningsmod**. Detta innebär att regler-algoritmen för motorstyrningen anpassas med en extern kondensator. Systemet blir genom detta mer känsligt för statiska avvikelser där förstärkning således ökar markant.

Tekniska och ekonomiska effekter av strömpendlingar

Projektet SBUF 14101 skall bla svara på frågan;

- Vilka är de ekonomiska effekterna av effektpendlingar?

Konsekvenser av resonanta vibrationer

Cyklistiska vibrationer kan ha en stor inverkan på en maskinkonstruktions livslängd, främst genom utmattningsskador, materialdegradering och försämrade prestanda. Här är de viktigaste faktorerna att beakta:

1. Utmattning och sprickbildning

Upprepade vibrationer skapar mekanisk spänning i materialet. Även om varje belastning är under brottgränsen kan upprepade påverkan leda till utmattningsbrott.

Små mikrosprickor kan växa över tid och slutligen leda till total materialfraktur.

2. Resonans och förstärkta krafter

Om vibrationsfrekvensen ligger nära eller matchar konstruktionens egenfrekvens kan vibrationerna förstärkas (resonans). Detta kan drastiskt öka påfrestningen och påskynda skador.

3. Lossning av fästelement och komponenter

Skrivar, bultar och svetsförband kan lossna eller spricka på grund av upprepade rörelser. Detta kan leda till funktionsfel eller oväntade haverier.

4. Materialutmattning och åldrande

Vibrationer kan påverka materialstrukturen genom att orsaka plastisk deformation eller förändrad mikrostruktur över tid.

I polymerer och kompositer kan vibrationer påskynda värmebildning och kemisk nedbrytning.

5. Smörjmedels- och lagerförslitning

Cyklistiska vibrationer kan störa smörjfilmer i rörliga delar, vilket leder till ökad friktion och slitage i exempelvis lager och kugghjul.

Hur kan man förlänga livslängden?

Dämpning och isolering: Användning av vibrationsdämpare, gummiupphängningar eller fjädringssystem.

Materialval: Högre hållfasthetsmaterial och mer utmattningståliga legeringar.

Frekvensanalys: Undvika resonans genom att anpassa konstruktionens geometri och massa.

Regelbunden inspektion: Kontroll av sprickor, lossade fästelement och lagerförslitning.

När vibrationsamplituden ökar påverkas maskinkonstruktionens livslängd på flera negativa sätt, främst genom snabbare utmattning, högre materialspänningar och ökad risk för komponenthaveri.

Här är de viktigaste effekterna:

1. Ökad utmattning och sprickbildning

Högre amplituder innebär att materialet utsätts för större spänningsvariationer per cykel. Större spänningar leder till snabbare tillväxt av mikrosprickor och kortare utmattningstidslängd.

Enligt Wöhler-kurvor (S-N-diagram) minskar livslängden exponentiellt med ökande spänningsnivåer.

2. Större deformation och plastisk påverkan

Vid höga amplituder kan vissa delar gå från elastisk deformation till plastisk deformation, vilket leder till permanenta skador.

Detta kan orsaka skevhet, ojämn belastning och accelererad materialdegradering.

3. Resonanseffekter och katastrofala skador

Om amplituden ökar vid eller nära konstruktionens egenfrekvens kan resonans uppstå, vilket dramatiskt förstärker vibrationernas effekt och leder till snabb kollaps.

4. Ökat slitage och försämrad smörjning

Högre vibrationer kan leda till snabbare lager- och kugghjulsslitage.

Smörjfilmer i rörliga delar kan brytas ned snabbare, vilket ökar friktionen och risken för varmgång och haveri.

5. Lossning av fästelement och komponenter

Bultar, muttrar och svetsfogar påverkas kraftigt av höga amplituder och kan lossna eller spricka. Detta kan orsaka mekaniska fel och potentiella säkerhetsrisker.

Sammanfattning

Cykliska vibrationer drastiskt minska en maskinkonstruktions livslängd om de inte hanteras korrekt. Strategier för vibrationskontroll och hållbar konstruktion är avgörande för att förhindra tidigt haveri.

Ökande vibrationsamplituder leder till exponentiellt kortare livslängd genom snabbare utmattningsskador, ökad materialdegradering och risk för resonansskador. För att hantera detta bör vibrationsdämpning, materialförstärkning och noggrann frekvensanalys användas i konstruktionen.

Troligen orsakar vibrationer ett ökat underhållsbehov.

Tillgängliga data kanske kan ge mer precisa uppskattningar på detta.

Vilka andra fenomen och konsekvenser skapas av effektpendlingar?

Mätningar som genomförts under projektet har även påvisat vissa andra konsekvenser. Nedan beskrivs två fall;

Rotebro Stockholm: En dubbelkross i Rotebro uppvisar en tydlig modulation på ca 10 sek. Denna överlagrade effektsvängning kommer från att båda krossarna är anslutna till samma spänningskälla vid transformatorn. Med olika belastningsgrad hos de båda krossarna kommer resonansfrekvenserna att skilja sig åt. I detta fall med max 0,1 Hz.

Detta visar sig sedan i den sammanlagrade effektsvängningen, som då uppvisar toppar och dalar med denna frekvens.

Froby, Västerås; Ett transformatorfel i Froby visade sig svara mot dels en stor skillnad i strömmarna mellan olika faser, men också en kraftigt förhöjd resistans. Den senare kan liknas vid ett svagt elnät som då påverkar matningsspänningen. Strömvariationerna var mycket höga -200-+900 A och resultatet blev att transformatorn brann upp efter en kort tid. I detta fall matade även krossen ut ström till elnätet. Det troliga skälet kan ha varit en anslutning till en fas i transformatorstationen blivit överhettad och brunnit upp?