

Overvejelser- og forslag til begrænsning / imødegåelse af lynstrømme gennem pitch-, hoved- og krøjelejer i horisontalt akslede vindmøller.

Følgende side 2 og 3 kan betragtes som forudsætninger for side 1. Da ønsker dette skrift begrænset til én side er konklusionerne efterfølgende sammenfattet i forkortet form på side 1.

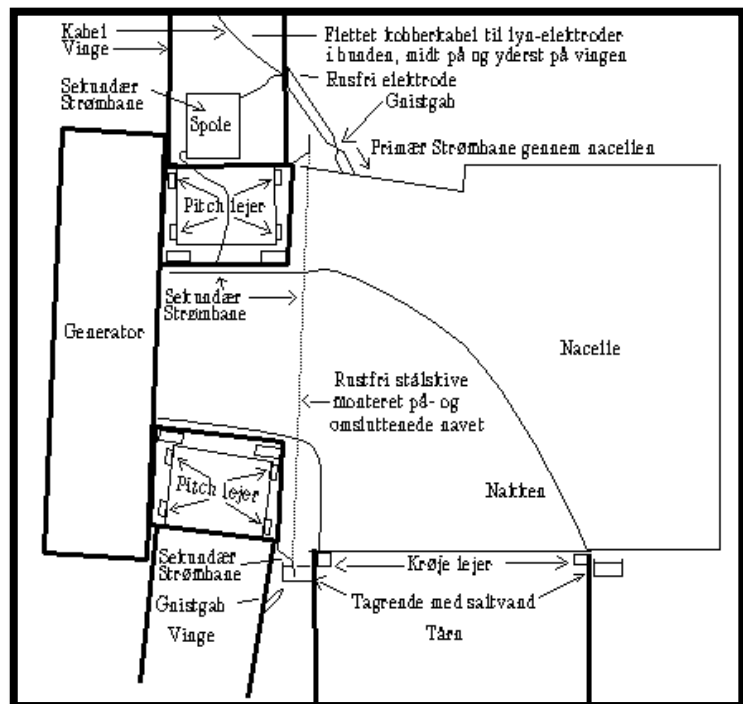
Hvis kugle- og rulle-lejer skal overleve lynnedslag i vindmøller, skal de beskyttes mod elektriske udladninger mellem ringene. Lynstrømme kan antage værdier på 200-300 kA med stigetider på 1-200 kA/μs.

En rationel beskyttelse indebærer en shuntning af største delen af lynstrømmen udenom lejerne. På grund af stigetidernes (og dermed lynstrømmens spektrale indhold) er induktansen L - og dermed den fysiske udformning af shuntningen – afgørende. Shuntning af lynstrømmen uden om de roterende emner – d.v.s fra vinger til tårn - realiseres bedst gennem gnistgab, hvor buespændingen kan holdes på ca. 100V.

Lynudladningen fra vinge til tårn i en mølle med gnistgab foregår i to tempi. Indtil gnistgabet er ioniseret løber næsten hele lynstrømmen gennem (induktansen L i): vinge / nav / hoved aksel / nacelle - og oplader dermed den kapacitans, der ligger over lejerne. Strømstigningen gennem induktansen L giver den spænding, der starter lysbuen i gnistgabet. Når buen etableres, kortslutter den L's vingeterminal til nacellens potential, og strømmen i L fortsætter med (yderligere) at oplade kapaciteten C over lejerne. Da den magnetiske energi i L overføres til C, og da $\frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} CV^2$, er det - for at undgå høje spændinger V over- og dermed gennemslag i lejerne – vigtigt at maksimere C og indføre en dæmpning af resonanskredsen LC.

I ref. 3 vises, at der ikke kan påregnes galvanisk forbindelse gennem roterende lejer. Derfor er her foreslået en dæmpning af LC filteret i form af en rustfri stålskive monteret på navet, hvor kanten af skiven kører nedsænket i et saltvandsbad på tårnet. Det er gennemslagstiden t' for gnistgabet, der sammen med resonanskredsen er akilleshælen. Mine forslag til beskyttelse af lejerne er derfor:

1. At indsætte gnistgab mellem vinger og nacelle som den primære strømvej for lynet.
2. At: a. anvende hovedlejet som coaxial kondensator for størst mulig kapacitans C over lejerne - og b. at udnytte induktansen L af navets fysiske udformning - sammen med lynes flankestøjhed - til at begrænse strømmen i den sekundære strømvej – og dermed spændingen over lejerne.
3. At indsætte en ohmsk last over LC filteret, i form af en rustfri stål skive på bagsiden af navet, således at kanten af skiven kører nedsænket i en saltvandsfyldt "tagrende" placeret om det øverste af tårnet. Saltet vil: a. give vandet større ledningsevne, b. virke som frostvæske c. reducere filterets godhed Q. Alternativt kunne anvendes børster og slæberinge.

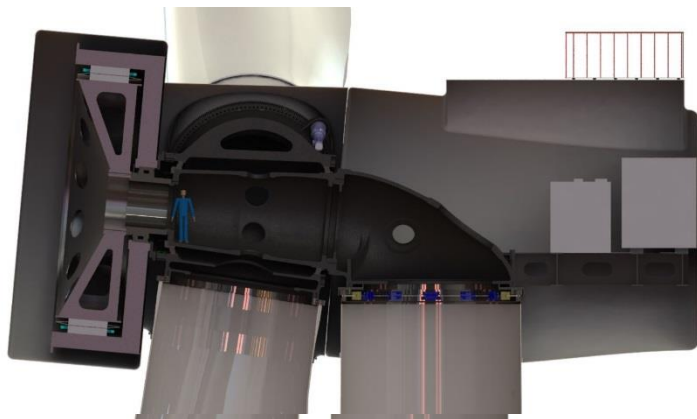


Aarhus den 6/3 2018
Steen Carlsen

Forudsætningerne for overvejelser- og forslag til begrænsning / imødegåelse af lynstrømme gennem pitch-, hoved- og krøje-lejer i horisontalt akslede vindmøller.

På fig. 3 vises en implementering af forslagene på møllen på fig. 2. Forslagene bygger på følgende strategier:

1. Etablering af primær strømbane for lynstrømmen, så mest mulig strøm går uden om lejerne.
2. Forøgelse af impedansen af ruten gennem lejerne for at minimere strømmen gennem lejerne.
3. At fremskynde- / henholdsvis sinke- overslag gennem de respektive luftgab og lejefedt.

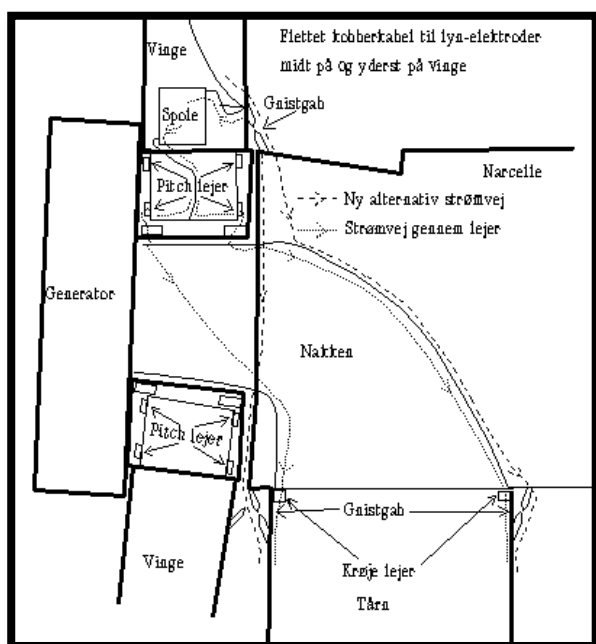


Af 1. følger, at impedansen af den alternative lynvej skal være mindst mulig; og dermed fysisk så kort som mulig og - for at minimere induktansen - så tæt som muligt på en ret linje fra vingen til tårnet.

Dette opnås ved at indsætte gnistgab i strømvejene – ét mellem hver af vingerne og nacellen - og evt. ét mellem nacellen og tårnet. Da vingen drejer (pitcher) i forhold til

navet, udføres gnistgabet på vingesiden som et udsnit af en kegle, hvis hældning peger ned mod nacellen og tårnets øvre kant. Keglen monteres nederst på bagsiden af vingen, så afstanden til- og retningen mod-nacellen holdes konstant, uanset i hvilken retning vingen er pitched. Vinklen af kegleudsnittet skal være \geq vingers pitch-rotation. På nacellesiden udformes gnistgabet ligeledes som en kegle, hvis hældning peger op mod den nederste kant af de kegleudsnit, der er monteret bag på vingen.

Afstanden i gnistgabet er afstanden mellem kanterne af de to keglesnit. For at holde gennemslagsspændingen lavest mulig, skal afstanden holdes mindst mulig. Feltstyrken E for gennemslag i luft varierer fra 300-3000 V/mm. Afstanden formodes produktionsmæssigt at kunne holdes på 1 +/- 1 mm – svarende til 0 - 6 kV. Af Ref. 4 Fig 3 udledes, at E for sikker gennemslag (8 μ s) ved stavformet gnistgab er $1100\text{kV}/50'' = 866\text{ V/mm}$.



Pkt. 2. For at begrænse spændingen over hovedlejerne ønskes lysbuen i gnistgabet etableret hurtigst muligt. Ved at lade den første og laveste del af lynstrømmen passere gennem en spole L (nederst i vingen), vil spændingen over gnistgabet blive forøget med $u = L di/dt$. Lysbuen starter, når luften i gnistgabet er ioniseret, hastigheden af dette afhænger primært af den elektriske feltstyrke i gnistgabet (- og der ud over af spændingskurveformen, gnistgabets fysiske form, tryk og fugtighed.)

Pkt. 3. For at begrænse / sinke spændingsopbygningen over hovedlejerne, udformes nakken og navet som en konisk coaxial kondensator C . Spolerne L udgøres af kablerne i vingerne - nærmest vingeroden – som $3/4$ vinding af en spole. Det vil være ønskeligt at forbinde kablet til navet fremfor til vingeroden, så strømmen ledes uden om pitchlejerne. Ved anvendelse af multi-core (braided cables) forventes kablerne at kunne optage pitchningen af vingerne uden at knække p.g.a. metaltræthed.

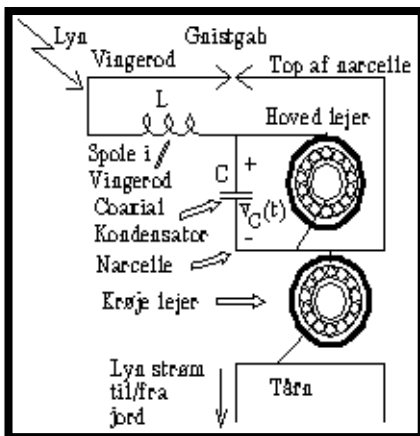
Beregninger og kvantitative data:

Af Ref. 4. fig. 3 & 4. fremgår, at kurverne for gennemslagsspændinger i gnistgab - som funktion af varigheden af de påtrykkede impulser - typisk flader ud for impulser $>2-10 \mu\text{s}$. For impulser kortere end disse gælder - med godt tilnærmelse - at tiden, til gennemslaget sker, aftager omvendt proportional med differencen mellem spændingen af den påtrykte impuls og den vedvarende isolationsspænding for gnistgab (Ref. 4/fig. 6). Ifølge ref. 4 holder denne sammenhæng mellem t' og impulsspændingen for homogene felter ned til ca. 10 ns. Af Ref. 4. fig. 4. fremgår endvidere, at sfæriske gnistgab giver den korteste gennemslagstid t' for en given kontinuerlig påtrykt gennemslagsspænding U_b . t' er - for det sfæriske gnistgab - 2-4 μs .

Kapacitans i Frank Leferinks lejer - i forhold til kapacitansen mellem nav og hals:

Ref. 3: Frank Leferinks: "Preventing lightning damage in bearings by using mechanical preloading" referere til målinger af elektrisk impedans for roterende lejer, der viser, at impedansen $Z(f)$ for roterende lejer aftager med 20 dB/dekade. For det aktuelle leje svarer det til en kapacitans $C = (Z(f) 2 \pi f)^{-1} = (1050 \Omega * 2 \pi 100 \text{ kHz})^{-1} = 1,56 \text{ nF}$. Modsvarende angives impedansen af et stillestående kugleleje at være uafhængigt af frekvensen og $<1 \Omega$. Heraf sluttes, at der gennem et roterende kugleleje ikke kan forventes nogen galvanisk forbindelse - men kun en kapacitans, og at lejefedt udgøre dielektrikummet.

Kapacitansen C over hovedlejerne: Navet roterer omkring halsen. Hvis afstanden t mellem nav og hals kan holdes på 1,0 mm, vil nav og hals udgøre en coaxial kondensator med en kapacitans på ca. $C = \epsilon_0 A/t$. Antages længden $l = 4 \text{ m}$ og diameteren $D = 2,5 \text{ m} \Rightarrow C = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} * 2\pi \cdot 2,5\text{m} \cdot 4\text{m} / 1\text{mm} = 556 \text{ nF}$.



Lynafledningskablet i vingen antages - mellem udtaget til gnistgab og afslutningen ved pitchlejerne - at være udformet som en spole på $3/4$ vinding ($N=3/4$) med en trådradius $r = 10 \text{ mm}$ og med en ydre radius $R = 2 \text{ m}$. Induktansen $L = \mu_0 N^2 R \ln(R/r + 0,25) = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H/m} * (3/4)^2 \cdot 2 \text{ m} * \ln(2,0 \text{ m} / 0,01 \text{ m} + 0,25) = 7,5 \mu\text{H}$. (Da navet vil virke som en delvis jernkerne i spolen, bliver $L > 7,5 \mu\text{H}$.)

98% af alle lyn har strømstigninger $>1 \text{ kA}/\mu\text{s}$. $<1\%$ af lyn har strømstigninger $>200 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Stigetiden for første impuls er typisk 1-10 μs og 0,25 μs for efterfølgende impulser. (Ref. 5).

Antages et lyn med en strøm $i(t) = t * 1 \text{ kA}/\mu\text{s}$ vil dette generere en spænding over spolen L på $U = L di/dt = 7,5 \mu\text{H} * 1 \text{ kA}/\mu\text{s} = 7,5 \text{ kV}$,

hvilket er 125% af worst-case for gennemslagsspændingen på 6 kV for et gnistgab på $t_{\text{max}} = 2 \text{ mm}$.

Reaktionstiden for overslaget forventes $t' < 1 \mu\text{s}$, men regnes her som 1 μs .

Strømmen gennem L ind i kondensatoren C (over hovedlejerne) når sit maksimum til tiden t' , når gnistgab udlades; $u(t') = 1/C \int i(t) dt = 1 / (2C) * t'^2 di/dt = 1 / (2 * 556 \text{ nF}) * (1 \mu\text{s})^2 1 \text{ kA}/\mu\text{s} = 899 \text{ V}$.

Til tiden t' vil der i spolen være oplagret en magnetisk energi på $E_{\text{mag}} = 1/2 L i(t')^2 = 1/2 L (t' * di/dt)^2$.

Efter t' vil gnistgab kunne betragtes som kortsluttet og E_{Mag} overføres til kondensatoren C . $E_{C-\text{max}}$ nås til tiden t^* , hvor $E_{C-\text{max}} = 1/2 C u(t^*)^2 = E_{\text{Mag}} + E_{C(t')}; \Rightarrow 1/2 C u(t^*)^2 = 1/2 L (t' di/dt)^2 + 1/2 C u(t')^2 \Rightarrow$

$u(t^*) = ((L/C) (t' di/dt)^2 + u(t')^2)^{1/2} = ((7,5 \mu\text{H} / 556 \text{ nF}) (1 \mu\text{s} * 1 \text{ kA}/\mu\text{s})^2 + (899 \text{ V})^2)^{1/2} = 3,78 \text{ kV};$

(- for en gennemslagstid $t' = 0,25 \mu\text{s}$ og samme forudsætninger fås en max spænding på 920 V.)

En tilsvarende beregning for $di/dt = 200 \text{ kA}/\mu\text{s}$ giver en gennemslagstid på ca. 16 ns og 11,7 kV over lejet.

Med en tykkelse af fedtlaget i et roterende leje på 50 μm , svarer det til 235 MV/m! Urealistisk! Se side 1.

Referencer er angivet på side 4.

Aarhus den 5/3 2018; Steen Carlsen.

Referencer:

Ref 1: STANDARD DNVGL-ST-0076; Edition May 2015; DNV GL AS;

Design of electrical installations for wind turbines.

Ref.2: Dehn: "Lightning and surge protection for wind turbines", WPO16/E/0515 2015 DEHN + SÖHNE.

Ref. 3. Frank Leferink: "Preventing lightning damage in bearings using mechanical preloading" University of Twente Enschede, The Netherlands 2016. Electric Power Systems Research 153 (2017)

Ref 4: J. H. Hagenguth: "Volt-Time Areas of Impulse Spark-Over." IEEE Trans. Vol. 60, p 803.810, 1941

Ref 5: Steen Carlsen: "EMI/EMC Design and Control"; Bangalore, India 1991; Indo-German Technical co-operation.

