

The human discharge chain

Scott C. Dudley, Bret D. Heerema, and Ryan K. Haaland

Narges Safari

402100872

Sharif University of Technology

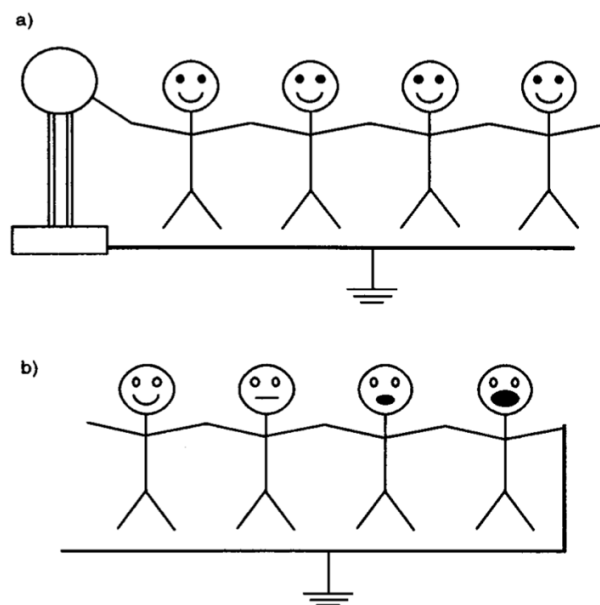
Winter 1403

<http://dx.doi.org/10.1119/1.18595>

بخش اول: خلاصه ای از مقاله

۱. مقدمه

این مقاله به بررسی رفتار یک زنجیره انسانی می پردازد که در آن افراد به صورت فیزیکی به یکدیگر متصل شده و به یک ورقه وان دوگراف وصل می شوند. ژنراتور وان دوگراف بار الکتریکی را به بدن ها منتقل می کند و سپس زنجیره از طریق آخرین فرد به زمین متصل می شود تا بار تخلیه شود. هدف اصلی در این مقاله، تحلیل انرژی تخلیه شده در هر فرد از زنجیره است و بررسی می کند که چرا فردی که زنجیره را به زمین وصل می کند، انرژی و در نتیجه شوک بیشتری دریافت می کند و چگونه با افزایش افراد داخل زنجیره این انرژی بیشتر می شود.



۲. مدل فیزیکی

برای شبیه سازی این فرآیند، هر فرد به صورت یک خازن فرض شده است که یک صفحه آن بدن فرد و صفحه دیگر آن زمین است. این خازن های متوالی (افراد) به وسیله مقاومت ها به یکدیگر وصل می شوند. با اعمال قوانین کیرشهوف در مدل مدار، معادلات دیفرانسیل مرتبه اول سیستم بدست می آیند. برای مثال این معادلات برای یک زنجیر چهار نفره به شکل زیر است که در آن $C=V=R$ است.

$$Q_4(t) + \dot{Q}_4(t) = Q_3(t)$$

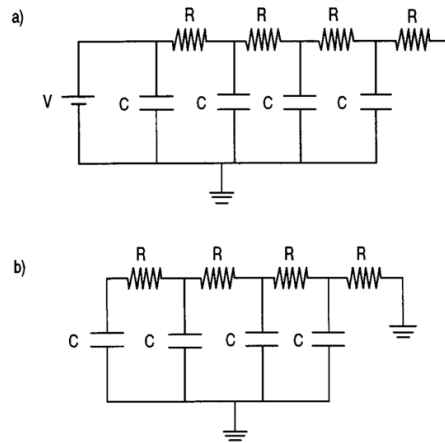
$$Q_3(t) + \dot{Q}_3(t) + \dot{Q}_4(t) = Q_2(t)$$

$$Q_2(t) + \dot{Q}_3(t) + \dot{Q}_4(t) + \dot{Q}_2(t) = Q_1(t)$$

$$Q_1(t) + \dot{Q}_3(t) + \dot{Q}_4(t) + \dot{Q}_2(t) + \dot{Q}_1(t) = 0$$

$$Q_1(0) = Q_2(0) = Q_3(0) = Q_4(0) = 1$$

و شکل این مدار به صورت زیر است.



در این شبیه سازی فرض کرده ایم که هر فرد یک واحد انرژی ذخیره شده $\frac{1}{2} CV^2$ دارد. همچنین با به دست آوردن جریان

و حل انتگرال زیر

$$\int_0^{\infty} I_i(t)^2 R dt$$

میتوان کل انرژی تلف شده در هر کدام از مقاومت ها (افراد) را محاسبه کرد که با توجه به اعداد به دست آمده متوجه می شویم با افزایش تعداد افراد درون زنجیره انرژی آخرین فرد بیشتر می شود.

به طور کلی، این اثرات را می توان به این صورت در نظر گرفت که فردی که تخلیه را انجام می دهد، تمام انرژی ذخیره شده در خودش را دریافت می کند، به علاوه ی کسری کاهش یافته از تمام انرژی ذخیره شده در افرادی قبلی زنجیره. برای فردی که در دورترین نقطه از تخلیه قرار دارد، انرژی بسیار کاهش یافته به این دلیل است که این فرد از طریق N نفر در حال تخلیه است. بنابراین، انرژی ذخیره شده در این فرد میان تمام افراد دیگر در زنجیره توزیع می شود.

۳. یک مثال عددی

در بخش بعد کدی زده شده که با استفاده از مقادیر زیر انرژی تخلیه شده توسط هر فرد را نشان میدهد.

تعداد افراد درون زنجیره (N): 4

مقاومت هر فرد (R): $1M\Omega$

ظرفیت خازن (C): $10^{-10} F$

ولتاژ اولیه (V): 1V

۴. نتیجه گیری

ما تخلیه بار در یک زنجیره انسانی را به صورت یک شبکه (مقاومتی-خازنی) مدل سازی کردیم. اثری که روی آن تمرکز داریم، انرژی ای است که به فردی که زنجیره را به زمین متصل می کند، منتقل می شود و این انرژی در مقایسه با تعداد افراد در زنجیره بررسی شده است. این انرژی با افزایش تعداد افراد در زنجیره افزایش می یابد و این افزایش نسبتاً کند است. نتایج ما نشان می دهد که فردی که با زمین تماس پیدا می کند، تمام انرژی ذخیره شده در خودش را دریافت می کند به علاوه کسری کاهش یافته از انرژی ذخیره شده در هر یک از افراد دیگر. همچنین همانطور که زنجیره افراد طولانی تر می شود، زمان تخلیه نیز افزایش می یابد. با این حال، این کسر ها ساده نیستند و منجر به برخی سؤالات جالب و بی پاسخ می شوند.

بخش دوم: شرح کد

این کد یک زنجیره از مدار های (مقاومتی-خازنی) را شبیه سازی میکند و انرژی تخلیه شده و بار ذخیره شده و جریان عبوری در هر گره از زنجیر را محاسبه و ترسیم می کند.

۱. وارد کردن کتابخانه های مورد نیاز

```
1 import numpy as np
2 from scipy.integrate import solve_ivp
3 import matplotlib.pyplot as plt
```

numpy: برای محاسبات عددی مانند آرایه ها و انتگرال گیری

scipy.integrate.solve_ivp: برای حل معادلات دیفرانسیل

matplotlib.pyplot: برای رسم نمودار ها

۲. تعریف معادلات دیفرانسیل

```
5 def rc_model(t, Q, R, C, N):
6     dQdt = np.zeros(N)
7     for i in range(N):
8         if i == 0:
9             dQdt[i] = -Q[i] / (R * C)
10        elif i == N - 1:
11            dQdt[i] = (Q[i - 1] - Q[i]) / (R * C)
12        else:
13            dQdt[i] = (Q[i - 1] - Q[i]) / (R * C) - Q[i] / (R * C)
14    return dQdt
15
```

تعریف نرخ تغییر بار به صورت:

dQ/dt

dQdt[i]: تغییر بار در هر گره به صورت زیر محاسبه میشود:

گره اول: بار خودش را تخلیه می کند

گره های میانی: هم بار خودشان را تخلیه می کنند و هم از گره قبلی انرژی می گیرند

گره آخر: بار خود را از گره قبلی دریافت و تخلیه می کند

۳. محاسبه انرژی تخلیه شده

```
16 def energy_dissipated(I, R, t_eval):
17     power = I**2 * R
18     energy = np.trapz(power, t_eval)
19     return energy
```

توان (P): توان لحظه ای در هر لحظه از جریان و مقاومت محاسبه میشود.

انرژی (E): با انتگرال گیری از توان در طول زمان محاسبه می شود.

۴. تنظیمات اولیه برای شبیه سازی

```
21 N = 4
22 R = 1e6
23 C = 1e-10
24 V = 1
25 t_span = (0, 1e-3)
26 num_points = 2000
```

مقادیر عددی که در بخش قبل انتخاب شد

t_span: بازه زمانی

num_points: تعداد نقاط زمانی برای دقت بیشتر

۵. تعریف شرایط اولیه بار

```
28 Q0 = np.zeros(N)
29 Q0[0] = V * C
```

آرایه ای با N مقدار صفر ایجاد می شود

فقط گره اول با بار اولیه:

$$Q_0 = CV$$

شارژ می شود

۶. تعریف نقاط زمانی برای محاسبات

```
31 t_eval = np.linspace(t_span[0], t_span[1], num_points)
```

۷. حل معادلات دیفرانسیل

```
33 solution = solve_ivp(rc_model, t_span, Q0, t_eval=t_eval, args=(R, C, N))
```

از solve_ivp برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می شود:

rc_model: معادله دیفرانسیل تعریف شده

t_span: بازه زمانی

Q0: شرایط اولیه

args: مقادیر R C N

۸. محاسبه انرژی تخلیه شده

```
35 energies = []
36 for i in range(N):
37     current = -np.gradient(solution.y[i], t_eval)
38     energy = energy_dissipated(current, R, t_eval)
39     energies.append(energy)
```

با استفاده از مشتق بار جریان هر گره محاسبه می شود

انرژی تخلیه شده برای هر گره محاسبه و ذخیره می شود

۹. نمایش نتایج انرژی

```
41 print("\n discharged energy for each person:")
42 for i, energy in enumerate(energies):
43     print(f"person {i+1}: {energy:.4e} Joule")
```

انرژی تخلیه شده در هر گره به صورت عددی نمایش داده می شود

۱۰. رسم نمودار بار برای هر گره

```
45 plt.figure(figsize=(10, 6))
46 for i in range(N):
47     plt.plot(t_eval, solution.y[i], label=f"charge of the chain {i+1}")
48 plt.xlabel("time(s)")
49 plt.ylabel("charge(c)")
50 plt.title("discharge of the charge in the chain")
51 plt.legend()
52 plt.grid()
53 plt.show()
```

بار ذخیره شده در هر گره بر حسب زمان رسم می شود

۱۱. رسم نمودار جریان برای هر گره

```
55 plt.figure(figsize=(10, 6))
56 for i in range(N):
57     current = -np.gradient(solution.y[i], t_eval)
58     plt.plot(t_eval, current, label=f"current of the chain {i+1}")
59 plt.xlabel("time(S)")
60 plt.ylabel("current(A)")
61 plt.title("current for each chain")
62 plt.legend()
63 plt.grid()
64 plt.show()
```

جریان در هر گره بر حسب زمان رسم می شود

بررسی منطقی بودن خروجی های کد:

۱. نمودار بار برای هر گره

این نمودار نشان دهنده نوسانات بار در گره های مختلف زنجیره انسانی است. برای ارزیابی منطقی بودن آن، باید چند مورد را بررسی کنیم:

۱. شکل نوسانات

به نظر می رسد بار در گره های میانی (مانند گره 3 و گره 4) نوسانات قوی تری دارد، در حالی که گره 1 نوسانات کمتری نشان می دهد. این مورد با واقعیت فیزیکی تخلیه بار در سیستم های زنجیره ای مطابقت دارد، چرا که گره های انتهایی کمتر تحت تأثیر تغییرات قرار می گیرند.

۲. رفتار میرایی

اگر مقاومت و ظرفیت خازنی به درستی تنظیم شده باشد، باید نوسانات با گذر زمان به تدریج کاهش یابند (اثر میرایی). در نمودار، این روند میرایی ضعیف است.

۳. مقیاس بار

محور y بار را در مقیاس 10^{-7} نشان می‌دهد. این مقدار برای یک سیستم با ظرفیت خازنی کوچک و مقاومت بالا منطقی است. اگر ظرفیت یا ولتاژ اولیه افزایش یابد، این مقدار باید بزرگ‌تر باشد.

۴. رفتار گره انتهایی

گره های انتهایی معمولاً بار بیشتری تخلیه می‌کنند و کمتر نوسان دارند.

در نتیجه این نمودار به صورت کلی منطقی به نظر می‌رسد

۲. اختلاف انرژی‌ها

۱. نقش گره اول

گره اول به عنوان منبع اولیه بار (charge) عمل می‌کند.

بار اولیه روی این گره به سرعت تخلیه می‌شود، زیرا فقط بار خود را از دست می‌دهد و نقش اصلی در تحریک گره های دیگر دارد.

بنابراین انرژی تخلیه شده این گره معمولاً کمتر از بقیه است.

۲. رفتار گره میانی

گره های میانی نه تنها بار خودشان را تخلیه می‌کنند، بلکه انرژی دریافت شده از گره قبلی را نیز انتقال می‌دهند.

بنابراین انرژی تخلیه شده آنها بالاتر خواهد بود.

۳. گره آخر

گره آخر فقط بار خود را تخلیه می‌کند و کمتر از گره های میانی انرژی دریافت می‌کند.

بنابراین انرژی تخلیه شده آن بیشتر از گره اول است.

اگر این مدل برای شبیه‌سازی سیستم‌های (مقاومتی-خازنی) استفاده شود، مقادیر انرژی‌ها و نسبت بین آن‌ها به نظر درست می‌آیند. گره اول به طور طبیعی کمترین انرژی را دارد، و گره‌های میانی انرژی بیشتری نسبت به گره اول دارند.

۳. نمودار جریان برای هر گره در زنجیره

۱. رفتار جریان در گره‌های مختلف

جریان در گره‌ها باید به مرور کاهش پیدا کند زیرا سیستم مقاومتی-خازنی (RC) باعث تخلیه بار در طول زمان می‌شود. همچنین نوسانات جریان‌ها باید به دلیل تعامل بین خازن‌ها و مقاومت‌ها تدریجاً کاهش یابند.

۲. ارتباط میان گره‌ها

جریان گره‌های میانی و انتهایی باید نسبت به گره ابتدایی رفتار متفاوتی نشان دهند، زیرا انرژی ذخیره‌شده در افراد مختلف در طول زنجیره کاهش می‌یابد.

در نتیجه این کد ممکن است مدل کاملاً دقیقی از مسئله را ارائه ندهد اما شبیه‌سازی نسبتاً درستی برای مقایسه انرژی‌ها خواهد بود.